



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Heinar Vaine**

**HELI LEVIMISAJA JA MIKROPUURIMISEL TEKKIVA VASTUPANU  
MÕÕTMINE KAHJUSTUNUD KONSTRUKTSIOONIPUIDUS**

MEASUREMENTS OF STRESS WAVE TIME AND RESISTANCE MICRO-  
DRILLING IN DECAYED STRUCTURAL TIMBER

Ehitusinseneriõppe lõputöö  
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Marko Teder, *PhD*

Tartu 2017

Lõputöö koostasin iseseisvalt. Kõigile töös kasutatud teiste autorite töödele ja andmeallikatele on viidatud. Kinnitan, et annan oma intellektuaalomandi varalised õigused lõputöö tulemuste suhtes üle Eesti Maaülikoolile.

.....  
kuupäev /nimi / allkiri /

Tunnistan lõputöö kaitsmisvalmiks.

Juhendaja:

.....  
kuupäev /nimi / allkiri /

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Heinar Vaine		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Heli levimisaja ja mikropuurimisel tekkiva vastupanu mõõtmine kahjustunud konstruktsioonipuidus			
Lehekülgi: 105	Jooniseid: 34	Tabeleid: 18	Lisasid: 25
Osakond: Maaehituse osakond Uurimisvaldkond: Puidu uurimine mittepurustavate meetoditega Juhendaja: Marko Teder Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2017			
<p>Magistritöös uuriti kas mittepurustavate katsemeetoditega saadud tulemused on sama usaldusväärsed kui visuaalsel vaatlusel saadud tulemused, seda konstruktsioonipuidus erinevate kahjustuste ulatuste juures. Lisaks võrreldi mittepurustava katsemeetodi (<i>Fakopp</i>) mõõtmise tulemuste sõltuvust puidu prao sügavusest saematerjalist katsekehades niiskusega 16-18%.</p> <p>Esmalt mõõdeti kahjustunud kuusest ja männist katsekehade tulemused märgitud kohtadest ristikiudu katseseadme <i>Fakopp Microsecond Timer</i> abil. Teiseks tehti täpselt samadest kohtadest vastupanu puurimised kasutades seadet <i>Resistograph</i>® 4453-P. Kolmandaks lõigati katsekehad kahe eelneva meetodi sooritamise kohast pooleks. Seejärel mõõdeti kahjustuse ulatus välja ristlõikelt joonlaua abil.</p> <p>Tehti kindlaks helikiiruse ja visuaalse kahjustuse vaheline seos. Kuusel on korrelatsioonikordaja <math>r=0,69</math>, mis vastab keskmisele seosel ning männil <math>r=0,82</math>, mis näitab tugevat seost. Siinkohal tasub märkida, et kui täpsus on oluline tuleb ikkagi eelistada resistograafi, hinnangu andmiseks terve, keskmiselt- ja tugevalt kahjustunud on <i>Fakopp</i> seade aga piisavalt usaldusväärne. Helikiiruse ja resistograafi omavaheline seos oli madalaim ning seega seda ei kasutada helikiiruse kaudu kahjustuse ulatuse leidmisel.</p> <p>Selgitati seoseid resistograafiga vastupanu puurimise ja visuaalse kahjustuse vahel, kus kuusel ja männil korrelatsioonikordajad vastavalt <math>r=0,93</math> ning <math>r=0,97</math>, mis näitavad väga tugevaid seoseid. Kahjustuse hindamiseks <i>Resistograph</i>® 4453-P abil võib edaspidi kasutada autori poolt välja töötatud vastupanu väärtuse piirmäära, millest allpoolsed väärtused lugeda kahjustuseks, kuusel vastavalt 106,9 ja männil 105,7.</p> <p>Töös on käsitletud ka kuidas mõjutab prao sügavus heli levimise kiirust. Mõõtmised tehti kolmelt erinevalt prao sügavuselt. Kusjuures mõra laius oli konstantselt 3 mm. Selgus, et mõra mõjutab helikiirust suhteliselt lineaarselt sügavuste vahemikus 65 mm, 37,5 mm, 12,5 mm ning 12,5 mm praost eemal. Männil siis vastavad helikiiruse langused: 48,0%, 38,1%, 17,6% ja 9,5% ning kuusel 37,0%, 32,4%, 11,5% ja 2,9%. Antud tulemustest järeldub, et helikiirust kuusepuidus mõjutavad praod vähem.</p>			
Märksõnad: resistograaf, helilevimise aeg, mittepurustavad meetodid, kahjustunud konstruktsioonipuit, puidu praod			

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Heinar Vaine		Speciality: Rural Building	
Title: Measurements of stress wave time and resistance micro-drilling in decayed structural timber			
Pages: 105	Figures: 34	Tables: 18	Appendixes: 25
Department: Department of Rural Building Field of research: Investigation of wood with non-destructive methods Supervisor: Marko Teder Place and date: Tartu, 2017			
<p>This master thesis takes under observation the investigation of decayed timber with non-destructive methods where results reliability was compared with visual inspection. Additionally, non-destructive examination were implemented with <i>Fakopp Microsecond Timer</i>, measured results connection between the depth of crack in saw timber at moisture content ranging between 16-18%.</p> <p>Firstly for measuring stress wave transmission time perpendicular to the grain of spruce (<i>Picea abies</i>) and pine (<i>Pinus sylvestris</i>) samples were used <i>Fakopp</i> device. Secondly was done resistance drilling measurements with <i>Resistograph</i> ® 4453-<i>P</i> at the same places as earlier mentioned method. Finally, the samples were cut in half at the place where two forementioned non-destructive methods were carried out. Thereafter was decayed range measured by ruler on the cross-section.</p> <p>After data analyses were determined correlation between stress wave speed and visually assessed decay. Spruce correlation coefficient was <math>r=0,69</math>, which refers to moderate relation and pine was <math>r=0,82</math>, which shows strong relation. For presicion should be prefer resistograph, to give general assessment: healthy, moderate- and severely decayed wood is <i>Fakopp</i> method adequate. Stress wave speed and resistograph correlation in between was lowest, thus not being used further for finding decay range through sound speed.</p> <p>Resistograph micro-drilling relation between visual inspection decay range was described in case of spruce and pine where correlation coefficient was accordingly <math>r=0,93</math> and <math>r=0.97</math> which both refers to a very strong relation. For an assessing range of decay in timber with <i>Resistograph</i> ® 4453-<i>P</i>, can be used in further researches values that are developed by author of that study. Limit relative resistance value for spruce are 106,9 and for pine 105,7.</p> <p>In this paper are handled also how does crack depth influences stress wave speed. Revealed that crack deepness influenced sound speed in chosen range closely to linear trend. Depths was 65 mm, 37,5 mm, 12,5 mm and 12,5 mm from the crack. Accordingly speed decrease in pine 48,0%, 38,1%, 17,6%, 9,5% and in spruce 37,0%, 32,4%, 11,5%, 2,9%. In these results turned out that cracks affect spruce sound speed less.</p>			
Märksõnad: resistograph, stress wave time, non-destructive methods, decayed structural timber, cracks in timber			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	7
1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST .....	9
1.1. Puidu ehitus .....	9
1.2. Eestimaised okaspuud .....	10
1.2.1. Mänd .....	10
1.2.2. Kuusk .....	11
1.3. Puidu füüsikalised omadused .....	12
1.3.1. Niiskus.....	12
1.3.2. Mahumuutus.....	13
1.3.3. Mahumass.....	15
1.3.4. Akustika .....	15
1.4. Puidu kahjustused.....	16
1.4.1. Defektid.....	16
1.4.2. Bioloogilised kahjustused .....	18
1.5. Puitu mittepurustavad katsemeetodid.....	21
1.5.1. Helilaine levimisaja mõõtmine.....	21
1.5.2. Vastupanu mikropuurimise meetod.....	23
1.5.3. Visuaalne kahjustuse hindamine .....	24
1.6. Kahjustuste mõju heli levimise kiirusele.....	25
2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA.....	29
2.1. Seade - <i>Fakopp Microsecond Timer</i> .....	29
2.1.1. Fakopp kasutusotstarve .....	29
2.1.2. Tööpõhimõte .....	30
2.1.3. Heli levimisaja mõõtmine ristikiudu .....	31
2.2. Seade – <i>Resistograph ® 4453-P</i> .....	32
2.2.1. <i>Resistograph ®</i> kasutusotstarve .....	32
2.2.2. Tööpõhimõte .....	33
2.3. Teised seadmed .....	33
2.3.1. Digitaalne nihkkaliiber .....	33
2.3.2. Puidu niiskusmõõtja .....	33
2.3.3. Katsekehade töötlemine .....	34
2.4. Uurimismaterjalide kirjeldus.....	35
2.4.1. I-rühma katsekehade hankimine ja töötlemine.....	35
2.4.2. I-rühma mõõtmised .....	36
2.4.3. II-rühma katsekehade hankimine ja töötlemine .....	38
2.4.4. II-rühma mõõtmised .....	40
2.5. Kahjustunud katsekehade uurimise töökäik .....	43
2.6. Statistiline andmetöötlus .....	45
3. TULEMUSED JA ARUTELU.....	46
3.1. Pragude mõju heli levimise kiirusele .....	46
3.2. Visuaalse kahjustuse ja resistograafi vastupanu seos .....	49
3.2.1. Kuusk .....	49
3.2.2. Mänd .....	50
3.3. Heli kiiruse ja visuaalse kahjustuse vaheline seos .....	51
3.3.1. Kuusk .....	51
3.3.2. Mänd .....	52
3.4. Heli kiiruse ja resistograafi vastupanu seos .....	53
3.4.1. Kuusk .....	53
3.4.2. Mänd .....	54

3.5. Kolme meetodi omavaheline sõltuvus .....	56
3.5.1. Kuusk .....	56
3.5.2. Mänd .....	57
3.6. Helikiiruse põhjal kahjustuse ulatuse hindamine .....	59
KOKKUVÕTE.....	63
KASUTATUD KIRJANDUS .....	66
SUMMARY .....	68
LISAD .....	71
Lisa 1. Saematerjalist tervete ja tehispraoga katsekehade paksused ja heli levimisajad .....	72
Lisa 2. Männist tervete ja tehispraoga katsekehade heli levimise kiirused .....	74
Lisa 3. Kuusest tervete ja tehispraoga katsekehade heli levimise kiirused .....	74
Lisa 4. Kuusest kahjustusega katsekehade mõõtmiste tulemused.....	75
Lisa 5. Männist kahjustusega katsekehade mõõtmiste tulemused.....	77
Lisa 6. Kuusest kahjustusega katsekehade radiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid	79
Lisa 7. Kuusest kahjustusega katsekehade tangensiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid.....	80
Lisa 8. Kuusest kahjustusega katsekehade kõikide (radiaalsete kui ka tangensiaalsete) mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid.....	80
Lisa 9. Männist kahjustusega katsekehade radiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid	80
Lisa 10. Männist kahjustusega katsekehade tangensiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid.....	80
Lisa 11. Männist kahjustusega katsekehade kõikide (radiaalsete kui ka tangensiaalsete) mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid.....	81
Lisa 12. Kuusest katsekehades radiaal- ja tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu regressioonanalüüs.....	81
Lisa 13. Kuusest katsekehades radiaal- ja tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu regressioonanalüüs.....	81
Lisa 14. Männist katsekehades radiaal- ja tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu regressioonanalüüs.....	82
Lisa 15. Männist katsekehades radiaal- ja tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu regressioonanalüüs.....	82
Lisa 16. Kuusest katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm .....	83
Lisa 17. Kuusest katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm .....	83
Lisa 18. Kuusest katsekehades tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm .....	84
Lisa 19. Kuusest katsekehades tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm .....	84
Lisa 20. Männist katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm .....	85
Lisa 21. Männist katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm .....	85
Lisa 22. Männist katsekehades tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm .....	86
Lisa 23. Männist katsekehades tangensiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm .....	86
Lisa 24. Kõikide männist katsekehade mõõtmiskohtade ristlõiked .....	87
Lisa 25. Kõikide kuusest katsekehade mõõtmiskohtade ristlõiked .....	94

## SISSEJUHATUS

Puit kuulub vanimate ja olulisemate ehitusmaterjalide hulka. Antud materjali kasutamisel on pikad kogemused ning seega on selle puudused ja head küljed meile hästi teada. Lisaks on see enim ehituses kasutatav taastuv loodusvara.

Puidu suureks eeliseks on selle universaalsus ehitusmaterjalina – sobib nii konstruktsiooniks kui ka viimistluseks lisaks avatäidete, treppide ja mööbli valmistamiseks. Eestis on puidu kasutamisel pikad traditsioonid ning ka käesoleval ajal on see valdkond tugevalt edasi arenenud. Selle põhjuseks on asjaolu, et meil on olemas vajalik ressurss. Esiteks riigi territooriumist moodustab mets ca 40%. Lisaks on metsandus ning puitehituse valdkonnas spetsialistide koolitamine heal tasemel.

Ehitustehniliselt on puidult hulganisti häid omadusi. Väike mahumass võimaldab ehitada ilma võimsa kraanata ning aitab kokku hoida hoone vundamendi arvelt. Suur tugevus omakaalu suhtes. Kuna soojusjuhtivus on puidul madal siis massiivpuidust hoone vajab oluliselt vähem soojustust kui näiteks kivihoone. Puidu töödeldavus on hõlbus ja kõige käepärasem ka iseehitajale. Universaalsus sobivus konstruktsioonide aga ka viimistluse ning mööbli valmistamiseks.

Positiivsete omaduste kõrval on ka hulganisti puudusi. Ebaühtlane struktuur on miinuseks eelkõige konstruktsioonides, mis on vastutusrikkad. Tugevused on erinevad kolmes erinevas suunas radiaal-, tangentsiaal-, ja aksiaalsuunal. Kui suundade järgi on puit kergesti määratav siis oksakohad tekitavad suuremaid määramatusi. Seetõttu toimubki saematerjali klassidesse jaotamine tugevussorteerimisega kas visuaalse vaatluse või masinsortimise teel.

Kuna tegemist on orgaanilise materjaliga võivad seda kahjustada putukad ja röövikud, kes sellest toituvad või selles elutsevad. Kõige suurem põhjus miks puithoonete eluiga on suhteliselt lühike, on selle kõdunevus, mineraalsetel ehitusmaterjalidel viimast probleemi ei esine ja eksploatatsiooni periood sellest lähtuvalt ka pikem. Eelnimetatud probleem tekib aga alati niiskuse tõttu ning kuivades tingimustes kõdunemist toimuda ei saa. Seetõttu on veeauru kondenseerumise vältimine ja katuse veepidavus hoonele elulise tähtsusega.

Puidu eluea pikendamise huvides ongi vaja seda aegajalt hinnata ja jälgida. Sellisel juhul on võimalik juba enne suuremate probleemide tekkimist võimalik puudused kõrvaldada nii, et need ei jõua konstruktsioone kahjustada.

Kui puit on juba kahjustunud, siis on selle hindamine vajalik kasutajate turvalisuse ning ehitise kestmise huvides. Hindamise kaudu saab teada, kahjustuse ulatuse ning seejärel on võimalik juba vastavalt võtta kasutusele edasised meetmed nagu näiteks tala tugevdamine. Hindamiseks on võimalikud purustavad meetodid. Töötavas või ajaloolise väärtusega hoonetes seda meetodit üldjuhul kasutada ei saa, lisaks on see kallis ja töömahukas.

Alternatiiviks on mittepurustavad meetodid. Kõige lihtsam neist on väline visuaalne vaatlus, kuna aga puidu kahjustus võib sageli alguse saada puidu seest, siis võib selle põhjal ekslikke järeldusi teha. Samuti on odav ning käepärane võimalus lihtsalt koputades kõla järgi infot saada puidu seisukorra kohta see aga nõuab teadmisi ning suurt kogemust. Tänapäeval on levinud mittepurustavateks meetoditeks heli levimisaja mõõtmine ning resistograafia vastupanu puurimine. Käesolevas töös just viimaseid meetodeid käsitletaksegi, kuna need on ka varasemalt andnud suhteliselt häid tulemusi.

Heli levimise aega mõõdeti seadmega *Fakopp Microsecond Timer* ja vastupanu puurimised teostati seadmega *Resistograph* ® 4453-P, kuusest ja männist kahjustunud konstruktsioonipuidust katsekehad lõigati uurimiskohtadest pooleks. Pooleks lõigatud ristlõikelt mõõdeti ära kahjustuse ulatus ning arvutati selle osakaal läbimõõdust.

Võrreldi reaalselt ehk visuaalselt kahjustust mittepurustavate meetoditega, et teada saada kumb mõõtmismeetod annab täpsemaid ja usaldusväärsemaid tulemusi. Võrreldi ka meetodeid omavahel, et saada teada kas nende kombineerimine võiks tulemusi parandada.

Eraldi osana kontrolliti kuidas mõjutab pragude sügavuse erinevus helikiiruse väärtust. Seda ei kontrollitud resistograafi suhtes, sest kahjustus resistograafi näidult on vastavalt juba prao laius. Viimased katsekehad olid terved, niiskussisaldused jäid 16-18% vahele ning toodud kõik Puumarketist.

Autor tänab oma lõputöö juhendajat, EMÜ metsanduse- ja maaehitusinstituudi maaehituse osakonna lektorit, Marko Tederit korrektse, arusaadava ja abivalmi juhendamise eest magistritöö koostamisel.



# 1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

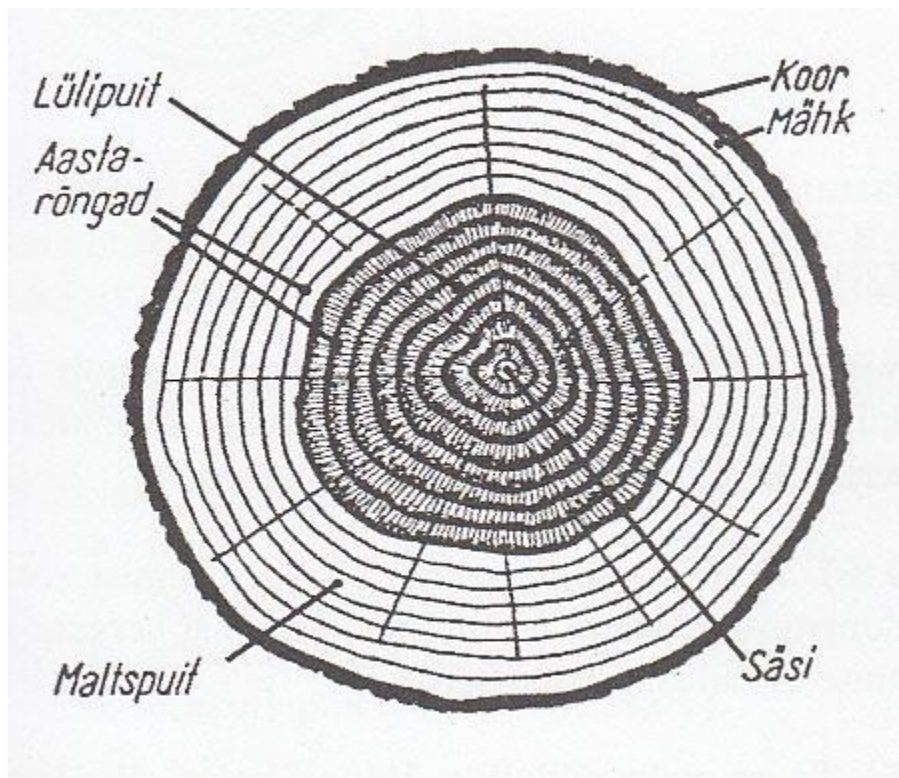
## 1.1. Puidu ehitus

Puu elutegevuse näitajaks on aastane juurdekasv – uue aastarõnga moodustumine algab kevadel (mais) ja lõpeb sügisel. Et puitu saadakse valdavalt tüvest, on küllaltki oluline teada aastarõnga juurdekasvu puu tüves aasta jooksul ehk vegetatsiooniperioodil. Juurdekasv ei peegelda mitte ainult puu elutegevust antud aastal, vaid akumulereb endas ümbritseva keskkonna mõjud puule. Puistu tagavara ja sortimentide kujunemisel etendab põhilist osa diameetri juurdekasv. Diameetri juurdekasvu abil saab hinnata puistu tehnilist küpsust, puu vanust jne.

Kasvukohatingimused, milles ladvavõrsed ja oksad kasvavad ning arenevad, määravad puu tüve sirguse, okste seisukorra esinemise sageduse. Kõigel sellel on suur tähtsus puidu praktilise kasutuse seisukohast. Puukrooni ehk võra suurus ja kuju sõltuvad suurel määral puu kasvuümbrusest. Kroon kasvab laiusesse, kui puu saab vabalt kasvada. Võra suurus on piiratud, kui ta peab tihedas metsas teiste puudega võistlema. [1]

Suurem osa puu aastasest juurdekasvust toimub kevadel, sõltudes nii kliimast kui ka mullastiku tüübist. Tisleri seisukohalt on oluline, et puud kasvaks noores eas võimalikult tihedalt, mis tagab hilisema sirge ja laasunud puutüve, millest valmistatakse kõrgekvaliteedilist saematerjali. [1]

Puutüve jämeduskasv toimub koore all olevas juurdekasvukihis ehk kambiumis. Analoogselt jämenevad ka oksad ja juured. Tüve ristlâbilõikes on puidu juurdekasv nähtav kontsentriliste ringide ehk aastarõngastena. Aastarõnga heledam osa – kevadpuit tekib kevadel vegetatsiooniperioodil esimesel poolel. Sügisel kasvanud aastarõnga tumedamat osa nimetatakse sügispuiduks. [1]



**Joonis 1.** Puutüve makroskoopiline ehitus [2]

Oluline on teada, et puutüvel toimub puidurakkude uuenemine kogu puu ulatuses (uute rakkude moodustumise tulemusena pikeneb ja jämeneb puu). Vaadeldes puitu mikroskoobiga, selgub, et see koosneb väikestest individuaalsetest ühikutest ehk rakkudest, millel on olenevalt nende ülesannetest puidus erinev kuju. [1]

Kuna puitmaterjali tugevusomadused on võrreldes tema madala massiga suhteliselt head, teeb see asjaolu puidust väga hea ja laialdast kasutust leidnud ehitusmaterjali.

## 1.2. Eestimaised okaspuud

### 1.2.1. Mänd

Mänd (*Pinus sylvestris*) on Eestis kõige levinum metsapuu. Teda võib kohata kõikjal, ka seal, kus enamik teisi puid kasvada ei suuda. Mänd on lülipuiduline puu. Maltspuit on kollakasvalge värvusega, lülipuit on roosakas kuni pruunikaspunane. Värskeltraitud puidul erineb lülipuit maltspuidust vähe, kuid ajajooksul tumeneb ja eristub hästi. Aastarõngad on kõikidel lõikudel hästi tuvastatavad. Vaigukäike on arvukalt ja need on koondunud aastarõngaste sügispuiduosasse. [1]

Männi puit on pehme ja seega hästi töödeldav, kuid seejuures võrdlemisi tugev. Kiud asetsevad sirgelt, mis teevad puidu kergesti lõhestatavaks. Suur vaigusisaldus teeb puidu vastupidavaks mädanemise vastu. Männi puit on laialt kasutatav. Sellest saab head ehitusmaterjali ja ilusa mustri mööblit, parketti või vineeri. Mänd on tuntud ka ravimtaimena. Temast valmistatakse ka tehissiidi, plastmasse, kunstnahka ja tsellofaani. Vaiku kasutatakse tärpentini tootmiseks, millest saab lakke, värve, ehteid. Peamiselt männimetsade vaigust on tekkinud merevaik, mida kasutatakse nii kunstis kui ka meditsiinis. Eesti suurimate mändide kõrgus on 42-43 m ja jämedaim läbimõõt umbes 140 cm. [1]

### 1.2.2. Kuusk

Kuusk (*Picea Abies*) ehk harilik kuusk on umbes 45 kuuseliigist ainus Eestis looduslikult kasvav kuusk. Leviala suuruselt jääb kuusk harilikule männile veidi alla. Eestis kuulub kuusk kolme tähtsama metsapuu hulka, 21% riigi metsafondi pindalast on selle all, edastavad vaid mänd ja kask. Harilikult elab kuusk 250 aastat vanaks, maksimaalselt 500 aastaseks [1].

Kuusk on küspuiduline puu, see tähendab et värvuse poolest ei erine tema südamikupuit tavalisest koorealusest puidukihist nagu näiteks männil, mis on lülipuiduline puu. Kuusepuit on üks pehmemaid, see jääb alla männile, rääkimata juba lehisest või ebatsuugast, kuid on vaigusisalduse tõttu kaua püsiv ja kergesti töödeldav. Aastarõngad on kõikidel lõigetel hästi eristuvad. Puit on valge, nõrgalt kollaka või roosaka varjundiga. Puidu kõvaduse ja raskuse poolest edestavad lehtpuud okaspuud. Okaspuude seas kuulub kuusk kõige kergemate hulka. [1]

Kuuske tarvitatakse ehituspuiduks, mööbli tegemisel ja väga heade kõlaomaduste tõttu ka orelite, klaverite ja viiulite valmistamisel. Kuusk annab toorainet paberi, kinofilmide, tehissiidi ja tsellofaani tootmiseks, veel tehakse puitplaate, liipreid, küttepuuna on kuusk väheväärtuslik. Kuuse koor sisaldab 10% parkainet, mida kasutatakse nahaparkimisel. Koorest ja kändudest toodetakse vaiku. Kuusel on siiski ka omad puudused. Nimelt ei suuda ta liiga niiskes ega liiga kuivas kasvukohas võistelda männiga, samuti ohustavad teda kevadised öökülmad. Kuusel on ka väga palju erinevaid parasiite, suurem osa neist sööb tema puitu. Nii võib sageli metsas näha murdunud kuusetüve, mis on seest täiesti mädanenud. [1]

### 1.3. Puidu füüsikalised omadused

#### 1.3.1. Niiskus

Puidu niiskust väljendatakse veehulgaga protsentides puidu kuivkaalust.

Niiskus mõjutab olulisel määral puidu füüsikalisi-mehaanilisi omadusi.

Vesi esineb puidus kolmel kujul:

- 1) kapillaarvesi (ehk vaba vesi) - täidab rakud ja sisemised tühikud rakkude vahel;
- 2) hügrokoopne vesi (e. seotud vesi) - imendub raku seintesse;
- 3) keemiliselt seotud vesi – ainete koostises ning eraldub keemilisel töötlemisel. [4]

Kapillaar- ja hügrokoopne vesi eemaldatakse kuivatamise teel.

Niiskus on peamine puidu tugevust mõjutav parameeter. Seetõttu taandatakse puidu (tugevus)omadused 12% juurde, et neid saaks adekvaatselt omavahel võrrelda.

Vee hulga suurenedes kuni rakuseina küllastuspunktini, väheneb puidu tugevus eriti paindel ja survel, vähem nihkel ja eriti vähe tõmbel ja löökoormusel.

Niiskuse muutumisel toimub puitdetailil mahumuutus. Puidus on õhus leiduva veeauru tõttu alati niiskust. [4]

Puidu maksimaalne niiskus kõigub suurtes piirides. Nii on värskelt raiutud puidu niiskus 50...100% ja kauemat aega vees seisnud puidu niiskus läheneb 200%-le.

Niiske puit on kuivast alati nõrgem, sest niiskus eraldab puurakke teineteistest ja nõrgestab nendevahelist sidet. Kuna niiskuse osa puidus on väga tähtis, siis pööratakse sellele ka suurt tähelepanu ning sellest lähtuvalt jagatakse puitu järgmiselt:

- 1) absoluutselt kuiv puit (niiskuseprotsent on 0, kuivatatud 100...105°C juures);
- 2) toakuiv puit (8...13% puidu kuivkaalust);
- 3) õhukuiv puit (15...20%);
- 4) poolkuiv puit (20...25%);
- 5) toores puit (>25%, seda ehituskonstruktsioonides kasutada ei või). [4]

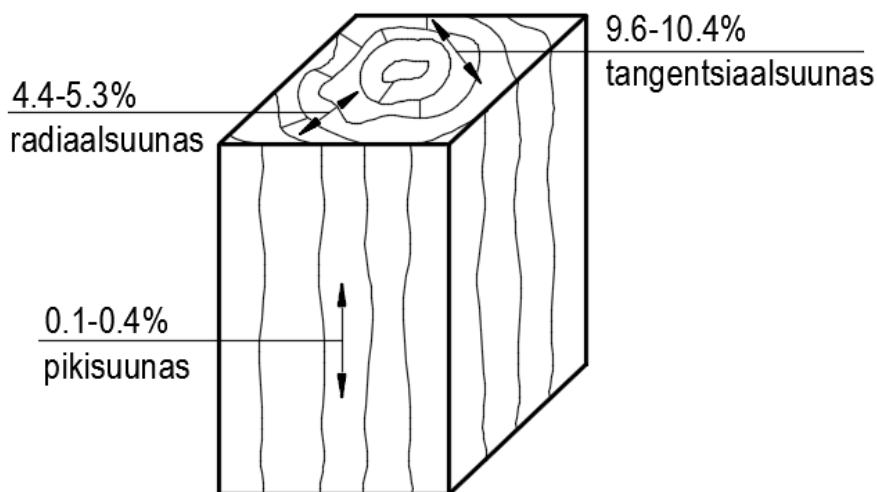
Ehituspuidu niiskus peab olema vahemikus 8-15%. Eriti rangelt tuleb niiskusesisaldust jälgida liimpuidu korral. Eksportkuiva puitmaterjali tarneniiskus on  $20 \pm 4\%$ . Sisevoodriks kasutatava puitmaterjali niiskussisaldus peaks olema alla 16%. Nõutav niiskusesisaldus on vaja kokku leppida tellimise ajal. [4]

### 1.3.2. Mahumuutus

Puit on hügrokoopne materjal. Seega õhu käes annab niiske puit soodsate ilmastikutingimuste korral oma vee ümbritsevale keskkonnale, kuiv puit hakkab niiskes keskkonnas endasse vett imema. Puidu niiskuse muutumisel 0-30% muutub puidu maht ja lineaarmõõdmed, s.t. toimub puidu paisumine ja mahukahanemine. [4]

Puidu kuivamisel eraldub kergesti rakkudes ja rakkudevahelistes tühemikes leiduv vaba vesi. Rakkude seintest seotud vee eraldumisega kaasneb puidu mahukahanemine. Vastupidine nähtus - puidu paisumine esineb siis, kui rakkude seinad hakkavad veega täituma. [4]

Puit ei deformeeru kõigis suundades ühesuguselt. Okaspuidu täielikul kuivamisel on pikisuunaline lühenemine 0,1-0,4%, ristikiudu ja radiaalsuunas 4,4-5,3%, tangentsiaalsuunas 9,6-10,4%. Tehnilisest seisukohast on olulised risti kiudu tekkivad deformatsioonid. Tangentsiaal- ja radiaalsuunaliste deformatsioonide suhe on ligikaudu 2:1, millest tingituna saetud materjal kuivamisel kaardub (vt joonis 2).

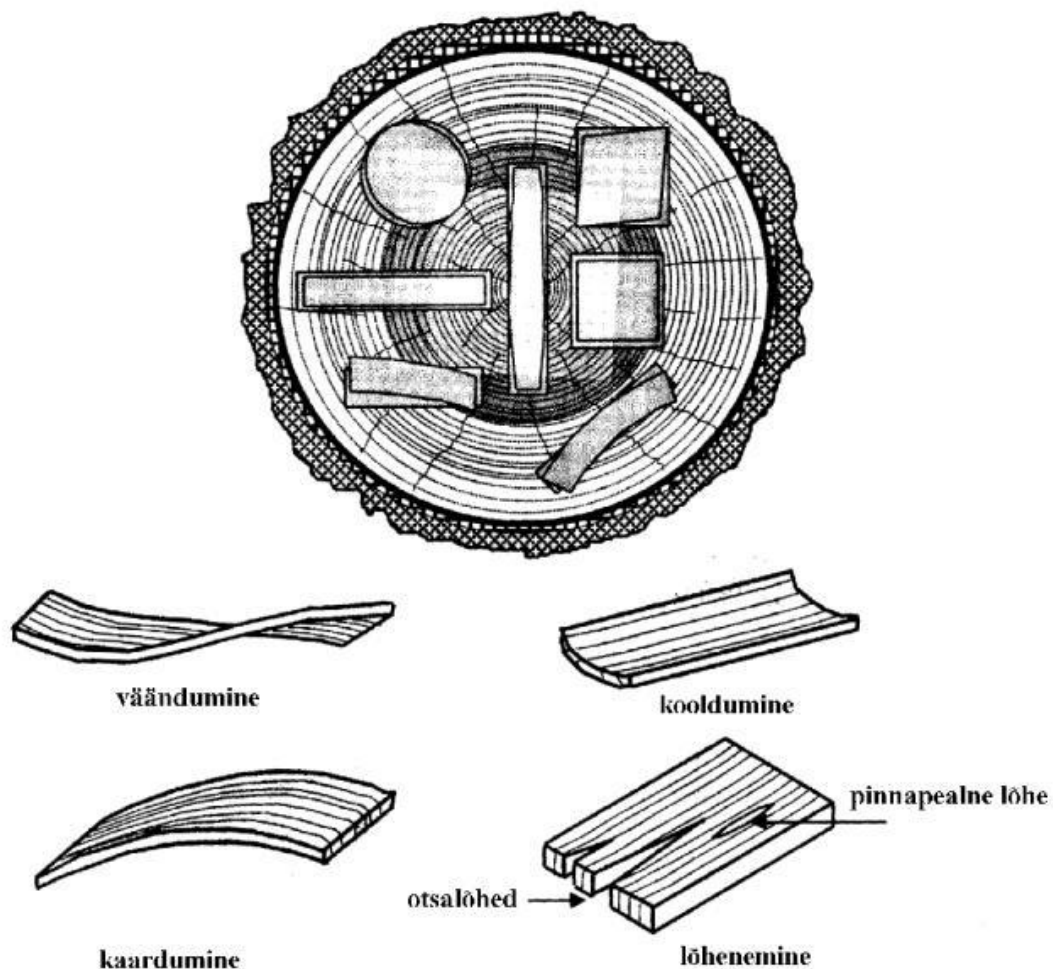


**Joonis 2.** Puidu suhteline mahukahanemine kolmes põhisuunas (tangentsiaal-,radiaal- ja aksiaalsuunas) [4]

Suur niiskusesisalduse muutus võib rikkuda näiteks sulundtarandi (kui 150 mm laiusega voodrilaua niiskus väheneb 30%-lt 10%-ni, siis tõmbub laud laiuses kokku 9 mm ja lauad tulevad sulunditest välja). Kuna puidu mahumuutus pole kõikides suundades ühesugune,

võib puittoode kõverduda ja praguneda. Tugevat puitmaterjali lõhenemist püütakse takistada säsiosa lõhestamisega. [4]

Teiseks paheks on radiaalsuunalised kuivamispraod, sest puidu kuivamisel annavad välimised kihid kiiremini vee ära ja püüavad tangentsiaalsuunas kahaneda, see aga on sisemise märja puidu tõttu takistatud. Siit tingituna tekivad tangentsiaalsuunalised tõmbepinged, mis ületavad puidu tõmbetugevuse ja lõhestavad puitu radiaalselt. Palgi erinevatest ristlõikeosadest saetud elementide võimalikud deformatsioonid on esitatud joonisel (vt joonis 3). [4]



**Joonis 3.** Palgi erinevatest ristlõikeosadest saetud elementide võimalikud deformatsioonid [4]

Kõrgetes temperatuurides kunstlikult kuivatatud puidu hügroskoopsus on mõnevõrra väiksem. Puidu hügroskoopsust võidakse vähendada ka immutamise või puidu pinna katmise teel sünteetiliste vaikudega. [4]

### 1.3.3. Mahumass

Mahumass (tihedus) – vaatamata sarnastele erimassidele, on mahumassid puidu liigiti erinevad. Seda tänu erinevusele poorsuses (20...55%). Mahumass sõltub tugevalt niiskusesisaldusest. Seetõttu on kokku lepitud, et mahumassi väärtused esitatakse 12% niiskuse juures. Tihedus (mahumass) on puidu tähtsaim omadus, suurema mahumassiga puit on tugevam. [4]

Liigitus tiheduse järgi:

- 1) kerge puit  $\rho^0 = 0.1 \text{ g/cm}^3$ ;
- 2) raske puit  $\rho^0 = 1.2\text{-}1.4 \text{ g/cm}^3$ ;
- 3) ehituspuit  $\rho^0 = 0.4 \text{ g/cm}^3$

Raku seina materjal ehk puitaine on kõikidel puiduliikidel ühesuguse loodusliku tihedusega. Mahumasside erinevus on tingitud puidu raku puitaine ja pooride mahu vahekorradest. Puitaine – rakuseina – erikaal (erimass) kõigub väga väikestes piirides ja on keskmiselt  $1.54 \text{ g/cm}^3$ . [4]

Puitkonstruktsioonide omakaalu arvutamisel tuleb lähtuda standardist EVS-EN 1991-1-1:2002, kus puidu mahumassid on esitatud puidu tugevusklasside järgi. Meil enam levinud puiduliikide mahumassid on keskmiselt ( $\text{kg/m}^3$ ) järgmised: mänd 530, kuusk 460, tamm 720, kask 640, saar 680, haab 340. [4]

Puitkonstruktsioonide arvutamisel kandepiiriseisundis kasutatakse normatiivseid ( $\rho_k$ ) puidu tihedusi ja kasutuspiiriseisundis arvutamisel kasutatakse keskmist ( $\rho_{\text{mean}}$ ) puidu tihedust. Standardites antakse vastavad normatiivsed ja keskmised väärtused, mis on erinevad tugevusklasside järgi. [4]

### 1.3.4. Akustika

Puidu akustiliste omaduste all mõistame peamiselt helijuhtivust ja resonantsivõimet (akustika on õpetus helist ja selle tekkimisest). Helilained levivad õhus kiirusega  $340 \text{ m/s}$ , tahkemes ainetes levib heli kiiremini. Heli kiirus puidus oleneb puuliigist (niiskusega 5-

7%) pikikiudu 3800...4800m/s ja ristikiudu 500...1500m/s (vt tabel 1). Hea helijuhtivus on ka puidu kvaliteedi tunnuseks, sest mädanikust rikutud kohad summutavad heli. [1]

**Tabel 1.** Helilainete levimiskiirus erinevates materjalides [1]

Materjal	Helilaine levimiskiirus (m/s)
Õhk	340
Kork	430...530
Puit ristikiudu	500...1500
Puit pikikiudu	3800...4800
Raud, klaas	5000...6000

Puitu, mis on sobiv muusikariistade tootmiseks, nimetatakse helipuiduks. Selliseks on näiteks oksavaba ja suhteliselt kerge kuusepuit (tihedus absoluutselt kuivalt 0,37-0,44g/cm<sup>3</sup>), mille aastarõngad on kitsad, korrapärase asetusega ning millel on head resonantsiomadused. Helipuiduna on tuntud kuusk, seeder, nulg,. Viiulitootmiseks kasutatakse Saksamaal kasvavaid mägivahtraid. Helipuiduks sobivad ainult tüve alumised osad, kuni 9 m kõrguseni. [1]

Ehitusmaterjalina on puidu helijuhtivus halvaks omaduseks, kuid vaatamata sellele kasutatakse teda ehitusmaterjalina väga palju. Et heli summutada, peavad seinad olema tihedad. [1]

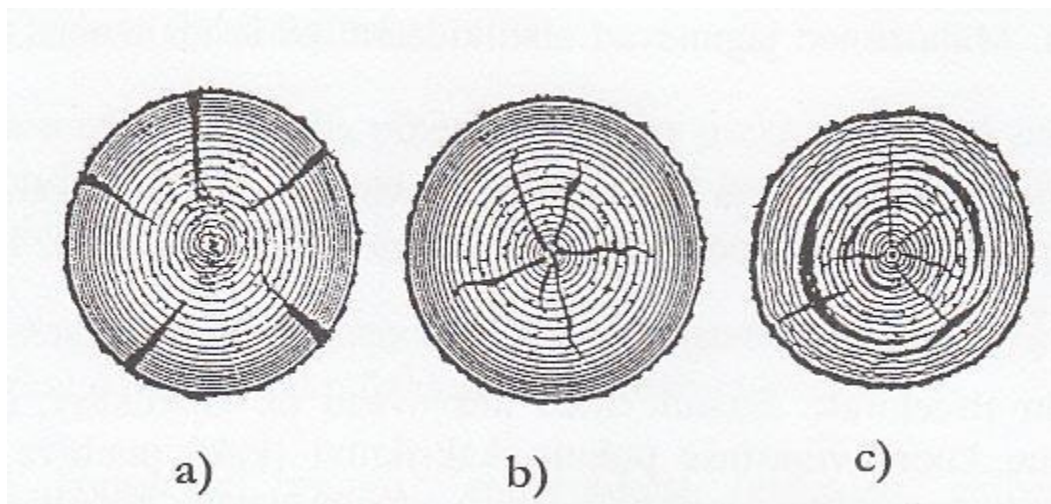
## **1.4. Puidu kahjustused**

### **1.4.1. Defektid**

Puidu defektideks nimetame järgnevalt selliseid vigasid, mis kahjustavad puidu tugevust, rikuvad puidu struktuuri ja välimust ning raskendavad töötlemist. Põhiliselt esinevad puidu rikked on praod ja oksad ning kasvuvead.

Praod jagunevad puidus välimisteks ja sisemisteks. Välispraod on radiaalsed, sisepraod võivad olla lisaks ka ringpraod (vt joonis 4).





**Joonis 4.** Puidu pragude tüübid: a) radiaalsed välispraod, b) radiaalsed sisepraad, c) ringpraod [2]

Kõige rohkem esineb puidul välispragusid. Need tekivad peamiselt puidu ebaühtlase kuivamisel. Kuivamisel praguneb saetud materjal vähem kui ümarmaterjal. Sisepraad võivad tekkida kasvavates puudes tugeva tormi tagajärjel. Viimaseid võib tekitada ka märja puidu külmumine. [2]

Oksad jagunevad erinevatesse tüüpidesse:

- 1) terve oks – kasvanud muu puiduga tihedalt kokku, selline oks ei kahjusta puitu oluliselt;
- 2) surnud oks – see võib olla puidus kinniselt või lahtiselt;
- 3) sarvoks – see on muust puidu osast tunduvalt tihedam, tumedam ja kõvem;
- 4) väljalangev oks – see esineb puus koos koorega, kuivamisel kukub väljalangev oks õhematest laudadest välja;
- 5) tubakoks – see on pehme ja kõdunenud, tubakoks kukub puidust tükkhaaval välja. [2]

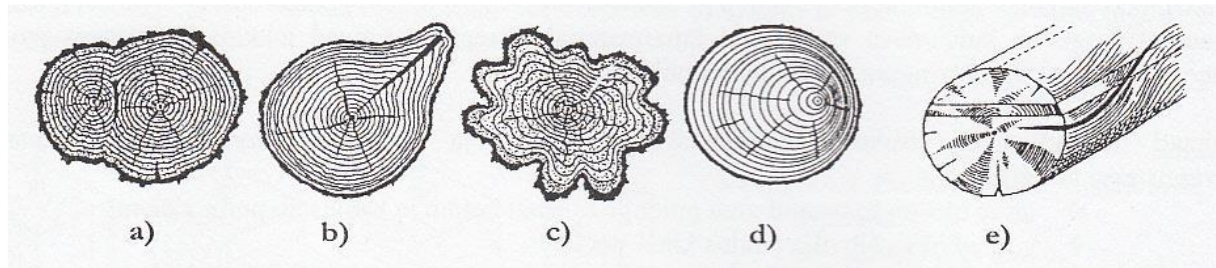
Oksad vähendavad puidul nii tõmbe- kui ka paindetugevust, survetugevusele need olulist mõju ei avalda. Seetõttu on otstarbekas talas suuremate oksakohtadega külge asetada survetsooni.

Kasvuvead rikuvad puidu siseehitust, need kahjustavad rohkem sae- kui ümarmaterjali.

Kasvuvigadeks võivad olla (vt joonis 5):

- 1) keerdkasv;
- 2) salmilisus – puukiud on segamini;
- 3) sissekasv – tekib puutüve vigastuse korral;
- 4) kaksiktüvi – kaks puutüve on kokku kasvanud;

- 5) ekstsentriline südamik – aastarõngad on ühel poolel paksemad;
- 6) ebanormaalne koonilisus – tüvi peeneneb liiga järsku;
- 7) külmalõhed;
- 8) kõverkasv;
- 9) voldiline tüvi jne. [2]



**Joonis 5.** Puidu pragude tüübid: a) kaksiktüvi, b) külmalõhe, c) voldiline tüvi, d) ekstsentriline südamik, e) keerdkasv [2]

#### 1.4.2. Bioloogilised kahjustused

Puit kestab sajandeid, kui teda hoida kuivana. Kui puitu kasutatakse katmata tingimustes on ta vastuvõtlik elavatele ja mitteelavatele kahjustajatele, mis mõjutavad puidu struktuuri. Elutud ja füüsilised tegurid, s.h. kuumus, kulumine, ultraviolettkiirgus ning tugevad kemikaalid, mõjuvad aegamööda puidu tugevust vähendavatena. Nimetatud füüsilised mõjurid võivad olla märkimisväärsed harva, kuid suurimat riski kujutavad endast elavad ning bioloogilised tegurid, nt. seenkahjustused, bakterid ja putukad. Nimetatud kahjurid võivad kaitsmata puidus tekitada tõsiseid kahjustusi suhteliselt lühikese aja jooksul. [4]

Puidu naturaalne kestvus ning vastupidavus seen- ja putukakahjustustele sõltub puidu liigist ning bioloogilistest näitajatest. Maltspuit on üldiselt väiksema vastupanuvõimega ning kahjustused toimivad seal kiiremini. Lülipuit on üldiselt vastupidavam, kuid see sõltub suuresti puidu liigist. [4]

Levinuimad puidu kahjustajad on:

- 1) puitu lagundavad seened;
- 2) puitu moondavad seened;
- 3) putukad.

Lagundavad seened põhjustavad kõige sagedamini järgnevaid mädanikke:

- 1) pruunmädanikku põhjustavad seened lagundavad tselluloosi ja hemitselluloosi. Puit värvub pruuniks, muutub hapraks ja lõhestub kuubikujulisteks osadeks. See on enim levinud mädanik (vt joonis 6);
- 2) valgemädanikku põhjustavad seened lagundavad ligniini. Puit muutub heledamaks, pehmeks, kiuliseks. See esineb valdavalt lehtpuidus, kuid hoonetes leidub harva (vt joonis 7);
- 3) pehmemädanikku põhjustavad seened arenevad põhiliselt lehtpuude puitunud rakuseintes ja lagundades seal paiknevat tselluloosi ja hemitselluloosi. Seda mädanikku võivad põhjustada lisaks seentele ka bakterid ning see võib toimuda väga suurtes temperatuuri- ja niiskustingimuste vahemikus. Puit muutub tumedamaks, tekivad praod ja puidu pind on käsnjas ja erodeerunud. Lagundavad vees asuvat, liigniisket või pinnasega kontaktis olevat puitu, kahjustus puidu pealmisel kihil ja toimub aeglaselt. [5]



**Joonis 6.** Pruunmädanik [15]



**Joonis 7.** Valgemädanik [15]

Põhilised moondavad seened jagunevad kaheks:

- 1) hallitusseened ei moodusta viljakehasid, tekivad väga kõrge (35-120%) puidu veesisalduse korral. Arenevad kõige sagedamini pinnakattevahenditega (värv, lakk vms) kaetud puitmaterjalide või värske saematerjali pinnal. Värvuselt on hallitusseened sinised, hallid või mustad. Muudavad ainult puidu välisilmet aga ei mõjuta selle mehaanilisi omadusi;
- 2) sinavusseened puidul kasvades muudavad materjali värvust. Võivad kahjustada puitu pindmiselt kui ka võivad tungida sügavale puidu sisse. Pikaajalise kahjustuse korral vähendavad puidu vastupanu löökkoormusele. Seened halvendavad puidu välisilmet ja suurendavad puidu veeimavust. Optimaalseteks keskkonnatingimusteks on 20-30 °C temperatuur ning 30-120% puidu veesisaldus. Viimasele seenkahjustusele on eriti vastuvõtlik männipuit ning selle vältimiseks on oluline, et lõigatud puit läbiks kiiresti niinimetatud poolmärja staadiumi. [5]

Tuntumad puitu kahjustavad putukad Eestis (mardikad):

- 1) Siklased
  - Majasikk
  - Sinisikk
- 2) Tooneseplased
  - Mööbli-toonesepp
  - Raudsepp
  - Suur-toonesepp

## 1.5. Puitu mittepurustavad katsemeetodid

Hoonete renoveerimisel on oluline hinnata puitkonstruktsioonide seisukorda. Ajaloolisi puittarindeid tuleb säilitada, et alles hoida algupärase konstruktsiooni eesmärki nii palju kui võimalik, sealjuures silmas pidades hoone kasutajate turvalisuse aspekti. Seetõttu on täpne olukorra hindamine vajalik puitkonstruktsioonide kasutuskõlblikkuse välja selgitamiseks. Purustavate meetoditega saab määrata puidu mehaanilised omadused kõige täpsemalt, olulisimad on surve-, tõmbe-, ja paindekatsedega saadud tulemused. Kui aga tahetakse säilitada hoone ajaloolist väärtust ei saa eelnimetatud meetodite vahel valida. [7]

Kuigi lisaks on üsna oluliseks konstruktsiooni hindamismeetodiks visuaalne vaatlus. Siis viimase meetodi kahjuks räägib subjektiivsus ning tulemuste sõltuvus vaatleja kogemustest ja oskustest. Samuti on esinevad tihti olukorrad, kus visuaalne vaatlus on piiratud, sest tarindi osa üks või mitu külge on kaetud ja/või selle ehitus ei võimalda vaatlusel kontrollimist. Järelikult on vaja kasutada teisi teaduslikult tõestatud meetodeid, et saada usaldusväärseid tulemusi. Siinkohal võivad mittepurustavad meetodid olla parimad hindamaks puitkonstruktsioonide seisukorda. [7]

Olemasolevad võimalikud mittepurustavad meetodid, mida saab kasutada puidu omaduste hindamisel ja kindlakstegemisel:

- mehaanilised (puurimise vastupanu, kõvadus, sisenemiskäitumine);
- elektrilised (elektrilise takistuse ja niiskusesisalduse vaheline korrelatsioon; elektrilise takistuse ja mädanikkahjustuse vaheline korrelatsioon);
- akustilised (heli kiirus, heli peegeldumine, helitugevuse nõrgenemine);
- termilised (soojaeraldumine);
- elektromagnetlained (nähtav valgus, *IR/NIR* kiirgus, röntgen (*X-ray*), neutronkiirgus, sünkrotronkiirgus) [8].

### 1.5.1. Helilaine levimisaja mõõtmine

Helilaine ajamõõtmise (*stress wave timing-SWT*) abil saab tuvastada puidus olevad seesmisi õõnsusi, mis viitavad kahjustuse olemasolule. Tööpõhimõte seisneb helilaine levimiseaja mõõtmisel läbi kahe sensori vahel oleva puitdetaili. Helilaine tekitatakse detaili sisse seda otse lüües või siis stardi-sensonile haamriga lüües, see annab stardisignaali taimerile. Teine



sensor püüab kinni leviva helilaine ning saadav taimerile stoppsignaali. Kahe sensori vahel helilaine levimisele kulunud aeg kuvatakse seadme ekraanil. Helilaine levimise kiirus sõltub otseselt puitdetaili omadustest [9].

*SWT* d on väga otstarbekas kasutada paksude puitdetailide korral, kus haamriga koputamine ei ole enam efektiivne. Mõlemalt küljelt on juurdepääs vajalik [10]. *SWT* mõõtmine ristikiudu on kahjustuse tuvastamiseks parim viis. On oluline märkida seda, et õõnsused ja tühimikud ei edasta helilainet, seega tuleb olla mõõtmisel tähelepanelik. Enne objektile suundumist, on kasulik teha endale selgeks eeldatavad helilevimisajad hinnatava puitdetaili kohta.

Heli levimisaja mõõtmismeetodit kasutatakse ka puidutööstuses konstruktsionipuidu tugevussorteerimiseks. Niisamuti olemasolevate puitkonstruktsioonide seisukorra hindamiseks.

Esimene samm tulemuste hindamise juures on määratleda etalon kiirused. Etalon kiirused saab määratleda mõõtes heli levimise kiirust täiesti tervel kahjustusteta osal sellel puul, mida mõõdetakse. Selle võimaluse puudumisel korral saame kasutada tabelis 5 antud kiirusi.

On võimalus ka hinnata efektiivselt kahjustuse ulatust. Vaja läheb sellisel juhul mõõdetud ( $V_{mes}$ ) ja etalon ( $V_{ref}$ ) heli levimise kiirusi. On võimalik saada järgneva valemiga:

$$\text{Suhteline heli levimise kiiruse langus} = (V_{ref} - V_{mes}) / V_{ref} * 100$$

Antud väärtusi on kirjeldatud tabeli 4 teises veerus.

Aeg-ajalt võib aga esineda olukordi, kus tõeliselt kahjustatud puidu puhul võib suhteline kiiruse langus ületada 60 %. Sellise kiiruse languse põhjuseks võib olla ka sageli asjaolu, et üks sensor on surutud juba kahjutunud puidu osasse. [18]

**Tabel 2.** Heli levimiskiirus sõltuvalt kahjustuse osakaalust [18]

Kahjustatud ala osakaal (%)	Suhteline heli levimise kiiruse vähenemine (%)
0	0
5	0
10	0
15	0-10
20	10-20
25	10-20
30	20-30
40	20-40
50	30-50
>50	>50

**Tabel 3.** Heli levimiskiirus erinevates puuliikides [18]

Puu liik	Radiaalne heli levimise kiirus [m/s]
Arukask	1140
Harilik kuusk	1310
Euroopa nulg	1360
Jaapani nulg	1450
Harilik mänd	1470
Must kuusk	1480
Lehis	1490
Harilik tamm	1620
Pöök	1670
Harilik pärn	1690
Harilik vaher	1690

### 1.5.2. Vastupanu mikropuurimise meetod

Vastupanu mikropuurimine (*resistance micro-drilling*) võimaldab uuritavat puitelementi kontrollida kogu selle ristlõikes. Mõõtmistulemused sõltuvad materjali vastupanust puurile läbimõõduga vahemikus 1,5 kuni 3,0 mm. Mõõtmisseadmeks on resistograaf (*Resistograph*® 4453-P), millel on elektrimootor ja see töötab akutoitel. Antud seade on väga otstarbekas kasutamiseks ajaloolise väärtusega puitkonstruktsioonides. Puurid on paindlikud ja nende pikkus sõltub resistograafi mudelist ja tootjast [12].

Vastupanu puurimise tulemuse väljatrükk on graafiline, graafiku tipud iseloomustavad kõrgemat vastupanu või tihedust ja põhjad vastupidist. Järelikult on võimalik selle abil tuvastada detaili sisemini defekte ja kahjustust.

Erinevad omadused nagu kõvadus, tihedus, tugevusklass, jääkristlõige ning biokahjustused ja looduslikud rikkeid saab kindlaks teha resistograafi graafikuid analüüsides. Samuti saab mõõta aastarõngaste laiust ja struktuuri. Eespool mainitud tugevusnäitajaid saab kasutada puittarindi jääktugevus omaduste arvutamiseks Eurokoodeks 5 põhjal [6]. Toetudes Kasal'i ja Anthony [13] aruandele on sõltuvus vastupanu puurimise ja puidutiheduse vahel väga muutlik, varieerudes vahemikus  $r^2=0,21-0,69$ .

Kõige suurem puudus on kontrolli lokaalsus. Uuritava puitelemendi seisukorrast tervikliku pildi saamiseks tuleb teostada arvukalt puurimiskatseid. Kuid see võib sageli olla piiratud

materjali autentsuse säilitamise huvides. Lisaks võib probleemiks osutuda puuri väike diameeter, sest see võib kergesti painduda puurimise käigus. Seetõttu võivad näidud olla ebatäpsed.

Mõõtmine kestab ainult 1-2 minutit. Tulemused prindib seade kohe paraleelselt mõõtmisega ja on koheselt saadaval. Lisaks võimaldab seade salvestada, kuni 500 mõõtmist mälu. Vastupanu profiile saab hinnata spetsiaalselt selleks mõeldud tarkvaraga DECOM ning neid saab kohe esitleda uurimustes ja aruannetes. [19]

Dunster on koostanud resistograafi tulemuste analüüsimiseks juhendi. Arvestada tuleb, et erinevalt kasvavate puude puurimisest võib resistograafi nõel läbida konstruktsioonides kasutatava puidu kasvurõngaid ükskõik missuguse nurga all. Resistograaf annab täpset informatsiooni lagunenu puidu ulatusest ja puidus olevate pragude kohta, kuid resistograafi profiilide analüüsimine võib osutuda keeruliseks ning graafikuid tuleks põhjalikult uurida enne otsuse tegemist. [20]

**Tabel 4.** Resistograafi profiilid kuusepuidust kahjustamata talal ja selgitused [20]

	Kui nõel läbib aastarõngaid tangentsiaalselt siis profiil võib jääda ühtlaseks.
	Keskmine profiil näitab puurimist aasta rõngastega risti. Kevad puit ja sügis puit joonistub profiilis selgelt välja.
	Mida tangentsiaalsel on nõela suund aastarõngaste suhtes seda halvem on aastarõngaid tuvastada.
	Kui nõel läbib tangentsiaalselt aastarõngaid, siis profiil jääb kauaks samale tasandile ja seda ei tohi tõlgendada lagunenu puiduna.

### 1.5.3. Visuaalne kahjustuse hindamine

Visuaalne vaatlus võimaldab hinnata välimist puidu kahjustust sisemine kahjustus on aga sageli varjatud piisava nähtava puitmaterjali puudumise tõttu. Paljud koormusele töötavate elementide osad nagu talade otsad on peidetud tihti müüritise sisse, samas on need kõige



altimad kahjustustele. Kahjustuse varajast staadiumit on peaaegu võimatu visuaalselt tuvastada. [14]

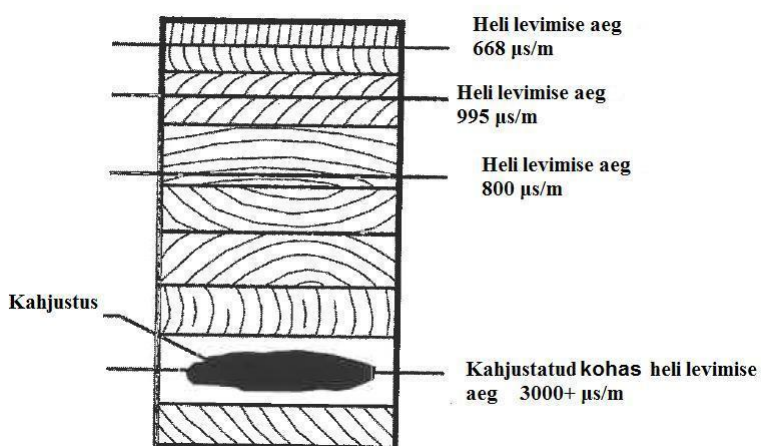
Visuaalset kahjustuse hindamist võib käsitleda otstarbest lähtuvalt erinevalt. Kõige laialdasemalt rakendatakse visuaalset vaatlust puidu välisel seisukorra hindamisel. Sage on ka viimase meetodi kasutamine puidu tugevussorteerimiseks. Võimalik on ka visuaalne kahjustuse hindamine konkreetsetes ristlõikes see aga nõuab detaili pooleks saagimist ja seega üldjuhul tavaolukordades rakendust ei leia. Antud töös just eelnimetatud viisi ka kasutatakse, kuna see annab hea võrldusmomendi mittepurustavate meetodite ja tegeliku kahjustuse ulatuse vahel.

## 1.6. Kahjustuste mõju heli levimise kiirusele

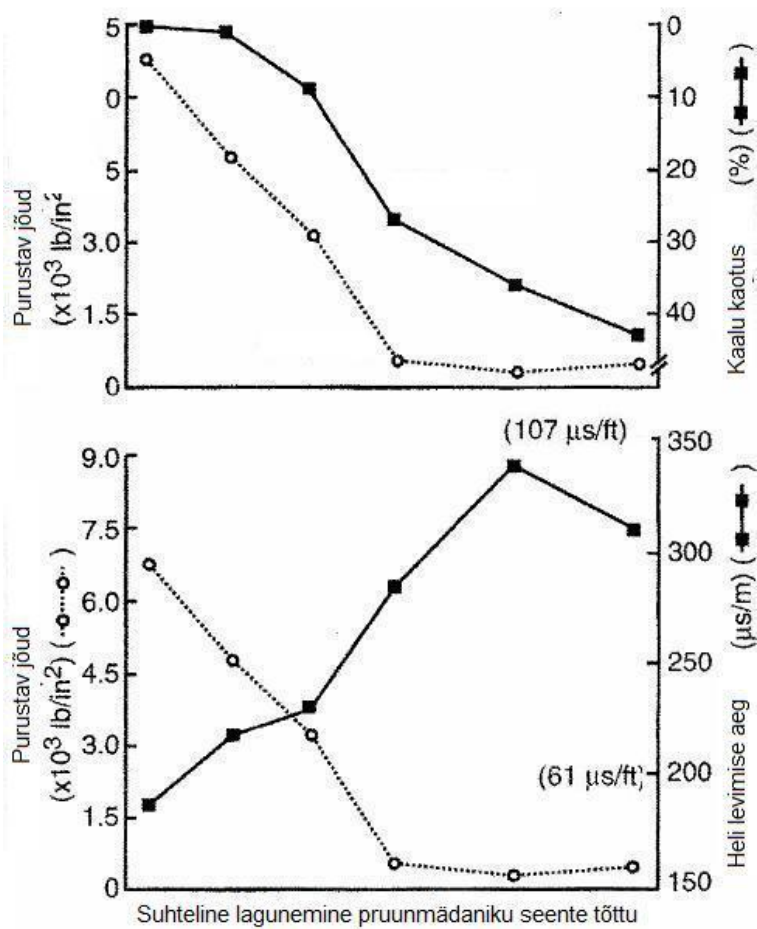
Mädaniku olemasolu puidus mõjutab tugevasti ristikiudu helilaine levimise aega puidus.

Heli levimise aeg kahjustatud puidus on tunduvalt suurem kui terves puidus. Näiteks terve Hariliku Ebatsuuga heli levimise aeg on ümmarguselt 800  $\mu\text{s/m}$ , samal ajal kui kahjustatud sama puidu heli levimise aeg küündib 3200  $\mu\text{s/m}$  või rohkem (vt joonis 8).

Uurimus [16] näitas, et 30 % heli levimise aja langus põhjustab langust puidu tugevuses 50 % (vt joonis 9). Erinevatelt konstruktsioonidelt mõõdetud tulemused näitavad samuti, et kui puidus esineb mädanikust põhjustatud kahjustusi, siis helilaine levimisaeg suureneb (vt tabel 2). [17]



**Joonis 8.** Heli levimise kiirused puidus [17]

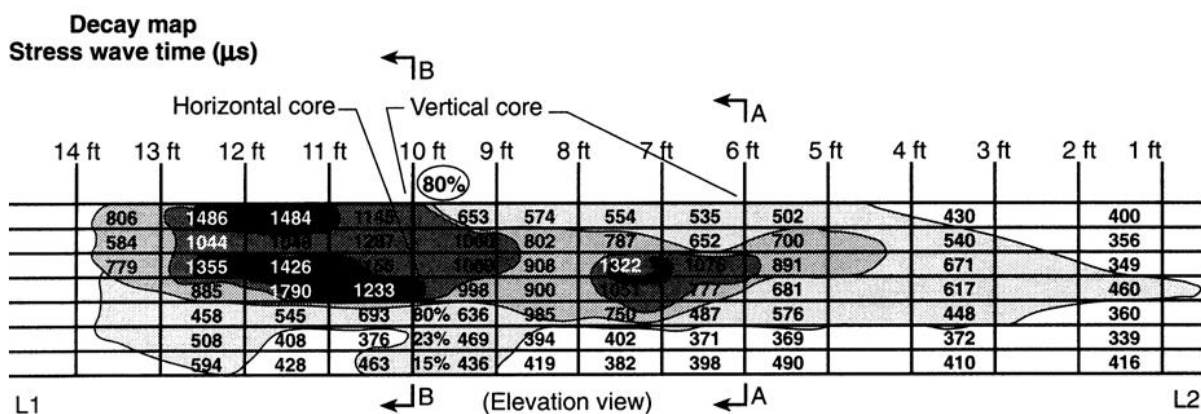


**Joonis 9.** Helilaine levimisaja ja seenkahjustuse omavaheline seos ( $1 \text{ lb./in}^2=6,9\text{kPa}$ ) [16]

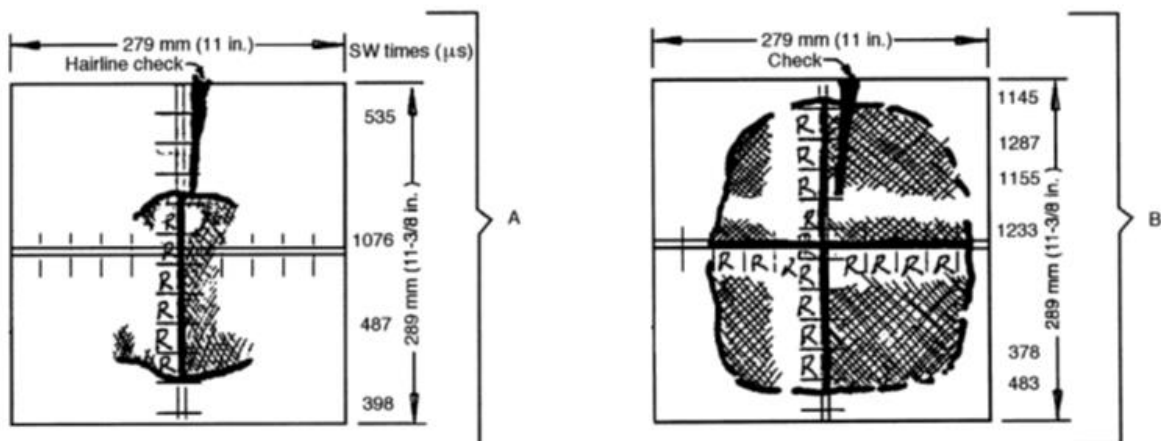
Kuna iga kahjustus on ainukordne, on mõistlik tulemusi esitada võimalikult kergesti loetaval viisil. Erinevatele kahjustusele on raske välja töötada ühtset standardit. Üks näide kuidas lahendada kahjustuse kaardistamine saadud helilevimiskiiruste abil (vt joonis 10 ja 11).

**Tabel 5.** Helilainete levimiskiirused erinevate uurimustööde põhjal [17]

	Mõõtmisobjekt	Puidutoode	Testimismeetod	Analüüs
Volny 1992	Sild	Harilik ebatsuuga liimpuit tala, töödeldud kreosoodiga	Ristikiudu heli levimise kiirusemõõtmine, pikikiudu 0,3 m pikkuselise intervalliga	Terve puit 1279 $\mu\text{s/m}$ Mõõdukalt kahjustunud 1827 $\mu\text{s/m}$ Tõsiselt kahjustunud 2430 $\mu\text{s/m}$
Ross 1982	Jalgpallistaadion	Saetud Harilik ebatsuuga, rõhu all kreosoodiga töödeldud	Ristikiudu mõõtmine, ühenduskohtade lähedal	Terve puit 853 $\mu\text{s/m}$ Algstaadiumis kahjustus- keset tarindit 1276 $\mu\text{s/m}$ 38 mm paks täispuit 2112 $\mu\text{s/m}$ Tõsiselt kahjustatud 3280 $\mu\text{s/m}$
Holey ja Pellerin	Kooli võimla	Hariliku ebatsuuga liimpuitkaared	Ristikiudu mõõtmine ühenduskohtade lähedal	Terve puit 1073 $\mu\text{s/m}$ Kahjustatud osa 1574 $\mu\text{s/m}$



**Joonis 10.** Kahjustuse kaardistamine (*decay map*) puitdetaili külgsuunas (*elevation view*) helilevimise kiirustega (*stress wave time*) abil mikrosekundites. Pikilõige on tehtud detaili vertikaalsest südamikust (*vertical core*) kogu pikkuses, horisontaalse südamiku (*horizontal core*) asukoht näidatud [17]



**Joonis 11.** Vasakpoolne ristlõige A ning parempoolne B, mõlemal on kujutatud visuaalsed defektid ja helilevimise ajad (*SW times*) mikrosekundites, ristlõike kõdunenud osa on viirutatud ja tähistatud R- tähega [17]

## 2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

### 2.1. Seade - *Fakopp Microsecond Timer*

#### 2.1.1. *Fakopp* kasutusotstarve

*Fakopp* seadmed on disainitud selleks, et hinnata konstruktsioonipuidu ja eluspuude seisukorda. Antud seadmetega on võimalik avastada tühimikke, mädanemist ja pragusid mittepurustaval viisil. *Fakopp* mõõdab helilaine levimisaega kahe sensori vahel. Seadme rakendamine on väga oluline vanade puude seisukorra hindamise juures. Need seadmed aitavad metsamehel leida optimaalset aega puude langetamiseks. Teine oluline võimalus antud seadme kasutusel on konstruktsioonipuidu ja vanade palkide tugevuse hindamise juures, mistõttu käesolevas töös antud seadet kasutatakse. Seadme nimi *Fakopp* tuleneb kahest Ungari keelsest sõnast „fa“ ja „kopp“ — need tähendavad puu ja heli. [18]

**Tabel 6.** *Fakopp Microsecond Timer* tehnilised andmed [18]

<b><i>Fakopp Microsecond Timer</i></b> (vt joonis 14), on seade mille abil mõõdetakse heli levimise kiirust puidus
<b>Tootja:</b> <i>Fakopp Enterprise</i>
<b>Tehnilised andmed:</b>
Seadme mõõdud ilma sensoriteta: 29 x 80 x 156 mm
Kaal: 220 g
Seadme funktsiooni nupud: „taasta“ nupp ja sisse/välja lüliti
Akutoide: 9V plokk patarei
Võimsustarve enne/pärast vajutamist „taasta“ nupule: 14/50 mW
Seadme karp: plastik, mitte veekindel
Patarei tühjenemise ekraani märguanne: „LO BAT“ sõnum
Ekraan: LCD ekraan 4 numbriline
Standardhälve: $\pm 1 \mu s$
Sensorid, start ja stopp samasugused: Kõrgtundlik vibratsiooni andur: SD-02
RS232 ülekande kiirus on fikseeritud: 300 bps
Ühenduse tüüp: DIL, isane pistik
Kasutus ja hoiustamis temperatuuri vahemik: -10 kuni 50°C

### 2.1.2. Tööpõhimõte

Terve puitmaterjal on hea helijuht, samas kui kahjustatud või mädanenud puit neelab ja ei juhi eriti hästi heli. Heli levimise kiirus terves puidus on tunduvalt kiirem kui mõne tühimiku või mädanenud kohaga puidus. Sellel põhjusel helilaine vältib puu kahjustatud kohti (liigub kahjustatud kohast mööda tervet puitu pidi). Kui kahe sensori vahele jääva sirgjoone sisse jääb mõni kahjustatud koht, siis heli ei levi enam sirgjooneliselt vaid liigub takistusest mööda ja tänu sellele muutub ka heli levimise kiirus aeglasemaks (vt joonis 12).



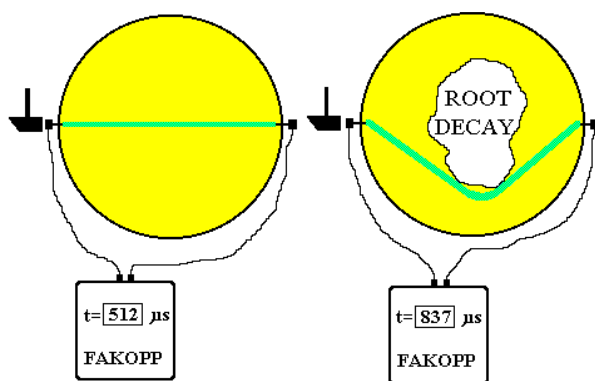
**Joonis 12.** *Fakopp Microsecond Timer* (üleväl start ja stopp sensorid, vasakul all digitaalne aega mõõtev ja kuvav seade ning paremal haamer helilaine tekitamiseks)

See tehnika testib puitu ainult selle joone pealt kus on parasjagu sensorid, kui kahjustatud koht ei satu parasjagu sellele kohale kust helilaine läbi läheb, ei pruugi kahjustatud koht antud testimise teel ilmned.

Selleks, et vältida ülaltoodud olukorda, peavad katse kohad olema omavahel risti [18].

Üle puidukiü niiskuse küllastuspunkti heli levimise kiirus eriti ei muutu, sest puidukiud juhivad siis helilainet ühtemoodi. Elavate puude puhul on niiskusesisaldus alati suurem puidukiü küllastuspunktist. Samuti mõjutab heli levimise kiirust puidus ka temperatuur. Õnneks pole see efekt eriti suur, sest kui temperatuur kasvab ühe kraadi võrra, siis väheneb heli liikumise kiirus umbes 3 m/s, seda temperatuurivahemikus 0-40 °C. [18]

Heli levimise kiirus on eriti tundlik sisemistele kahjustustele. Kui heli levimise kiirus on oluliselt madalam terves puus mõõdetud kiirusest, siis see tähendab seda, et puidus on mingisugune kahjustus. Kõrvalekalde suurus terve puidu kiirusest on sõltuvuses kahjustuse ulatusega (vt joonis 13). [18]



**Joonis 13.** Vasakpoolne pilt -heli levimise teekond terves puidus, parempoolne pilt — heli levimise teekond kahjustatud puidus mõõdetuna *Fakopp Microsecond Timer*-ga [18]

### 2.1.3. Heli levimisaja mõõtmine ristikiudu

Vastavalt valemile  $V=s/t$  ( $s$  — vahemaa,  $t$  — aeg,  $V$  — heli levimise kiirus), peab mõõtma vahemaad mida heli läbib ja aega mis selleks kulub. Heli levimise vahemaad mõõdetakse digitaalse nihkkaliibriga. Täpseks heli levimisaja arvestamiseks peab mõõtmistäpsus olema vähemalt  $\mu s$  ( $1 \times 10^{-6}s$ ). [18]

Nõelte puidu sisse löömiseks võib kasutada kummivasarat, aga peab olema ettevaatlik, et mitte vigastada mõõtesensorite juhtmeid. Mõõtesensoreid on 2, millest ühe pihta lüüakse metallhaamriga ja see tekitab omakorda heli, teine sensor toimib vastuvõtjana. Mõõtmisel tuleb sensorid suruda puitu, lülitada seade sisse, lüüa metallhaamriga (100 – 200 g) punase sensori pihta. Ekraanil kuvatakse näit. Igas kohas peaks mõõtmist tegema vähemalt kolm korda. Seade näitab heli levimise aega mikrosekundites, iga mõõtmiskohal tuleb arvestada kolme mõõtmise keskmine tulemus. Kui mõõdetava puidu diameeter on väga suur, tuleks haamrit tugevamini lüüa, sest selles sõltub suurte läbimõõtude puhul heli levimise kiirus. [18]

## 2.2. Seade – *Resistograph* ® 4453-P

### 2.2.1. *Resistograph* ® kasutusotstarve

Enamikel juhtudel ei ole visuaalse vaatlusega võimalik hinnata eluspuude või puidu sisemist olukorda, sellisel juhul on seda võimalik hinnata vastupanu puurimise teel. Tänavate äärsete-, pargi- ja metsa puude kontrollimiseks on resistograaf vägagi näidustatud. Eelkõige kahjustuste, õõnsuste ja pragude tuvastamiseks, samuti on võimalik sel teel hinnata puidu kvaliteeti. Põhimõtteliselt täpselt samu puidu omadusi on võimalik kontrollida ka puitkonstruktsioonides ja näiteks puitpostides. [19]

**Tabel 7.** *Resistograph* ® 4453-P tehnilised andmed [19]

<b><i>Resistograph</i> ® 4453-P</b> (vt joonis 14), resistograaf on seade millega puurimise abil saadakse puidu vastupanu suhteline väärtus
<b>Tootja:</b> RINNTECH
<b>Tehnilised andmed:</b>
Puuriseadme mõõdud 9 x 9 x 66 cm
Puuriseadme kaal 4 kg
Automaatne puurimiskiiruse kohandamine
Puurimissügavus 45 cm
Puuri hetke sügavust kuvav ekraan
Vahetatavad puurinõelad
Vastupanu graafiku väljatrukk, kuni 50 tsükli ilma paberivahetuseta
Mälu 500 mõõtmistsükli säilitamiseks
Aku kaal 5 kg
Aku mahtuvus 24 V x 14 Ah, kuni 180 mõõtmistsükliks



**Joonis 14.** Katseseade resistograaf - *Resistograph* ® 4453-P (üleval puurimisseade, keskel seadme andmete protsessor ja aku)



### 2.2.2. Tööpõhimõte

Mõõtmise operatsiooniks on vaid üks lüliti, mis toimib nii stardi kui ka lõpp signaali andmiseks. Puidu süvistamisel ei ole vaja puurimiskiirust valida, seade valib optimaalse kiiruse automaatselt. 1:1 suhtes skaala näitab alati puurimissügavust hetkeseisu.

Puidusüvistamisel mõõdab ja salvestab seade peenikesele puurile tekitatud vastupanu. Seade annab kohe manuaalse väljatrüki ning samuti saab graafiku ka digitaalsel kujul. Puidu kvaliteedi lõplikult hinnata saadud tulemuste graafikute abil. [19]

## 2.3. Teised seadmed

### 2.3.1. Digitaalne nihkkaliiber

Katsekehade dimensioonide mõõtmiseks kasutati vastavalt: pikkuse mõõtmiseks mõõdulinti, katsekeha läbimõõdu tarvis digitaalset nihkkaliibrit (vt joonis 15) ning jääkristlõike mõõtmiseks kasutati klassikalist metalljoonlauda.



**Joonis 15.** Digitaalne nihkkaliiber - Scala, täpsusaste 0,01 mm (taadeldud 2011-07-05)

### 2.3.2. Puidu niiskusemõõtja

Puidu niiskussisalduse kindlaks tegemiseks kasutati *Brookhuis FME* niiskusemõõtja (vt joonis 16).

**Tabel 8.** *Brookhuis FME* tehnilised andmed [21]

<b>Brookhuis FME</b> (vt joonis 16), niiskusmõõtja töötab elektritakistuse mõõtmise põhimõttel.
<b>Tootja:</b> <i>Brookhuis Micro-Electronics BV</i>
<b>Tehnilised andmed:</b>
Mõõtevahemik puidul 5 - 99%
Mõõtevahemik muudel ehitusmaterjalidel 0 - 99%
Mõõte täpsus 0,2%
Resolutsioon 0,1%
50 mõõtmistulemuse salvestamine seadme mälusse
Temperatuuri seadistamise võimalus -40 kuni +90°C
Seadme töötemperatuuri vahemik 0 kuni 50°C
Mõõdud 160x85x30mm
Kaal 260g



**Joonis 16.** Niiskusmõõtja – *Brookhuis FME*

### 2.3.3. Katsekehade töötlemine

Katsekehade mõõtmiskohtade märgistamise jaoks kasutati nurgikut, harilikku pliatsit ja markerit. Katsekehade õigesse pikkusesse lõikamiseks kui ka mõõdistuskohtadest pooleks lõikamiseks kasutati *Makita* järkamissaagi. Soonte sissesaagimiseks kasutati *Makita* saepinki (saetee 3 mm).

## 2.4. Uurimismaterjalide kirjeldus

Käesoleva uurimustöö eesmärgiks oli uurida Eestis looduslikult kasvavatele okaspuudele heli levimise kiiruse, resistograafi näitude ja visuaalse kahjustuse omavahelisi seoseid. Mõõtmistel kasutati 2 erinevat katsekehade rühma: kahjustuseta ja sisselõikega (tehispraoga) saematerjal (edaspidi I-rühm), kus teostati vaid helilevimiskiiruste uurimine, erinevate kahjustuse astmetega kasutuses olnud konstruktsioonipuit (edaspidi II-rühm), kus kasutati kolme eelnimetatud meetodi omavahelist võrdlust. Mõlemas kasutati kahte okaspuu liiki – harilik mänd (*Pinus sylvestris*) ja harilik kuusk (*Picea abies*).

Teine väljund on antud I-rühmaga uurida, milline on pragude mõju heli levimise kiirusele võrreldes mädanikkahjustusega. Kui hüpotees peab paika siis võivad mardika kahjustused samuti omada helilevimise kiirusele väikest mõju.

Teise rühma peamiseks eesmärgiks on uurida, kui suur on reaalse vaatluse käigus tuvastatud jääkristlõike seos helilevimise kiiruse ning vastupanu puurimisega erinevate kahjustus ulatustega konstruktsioonipuidus.

### 2.4.1. I-rühma katsekehade hankimine ja töötlemine

Esimese rühma katsekehad toodi Puumarketist, katsekehade ristlõike mõõdud olid 97...105 x 97...105 mm ning esialgne pikkus 3 meetrit seda nii kuuse- kui ka männipuidust katsekehadel. Saematerjali valikul lähtuti, et puusüdamik jääks võimalikult sümmeetriliselt ristlõike keskossa. Edasine katsekehade töötlemine ja mõõtmine toimus EMÜ MMI konstruktsioonide laboris.

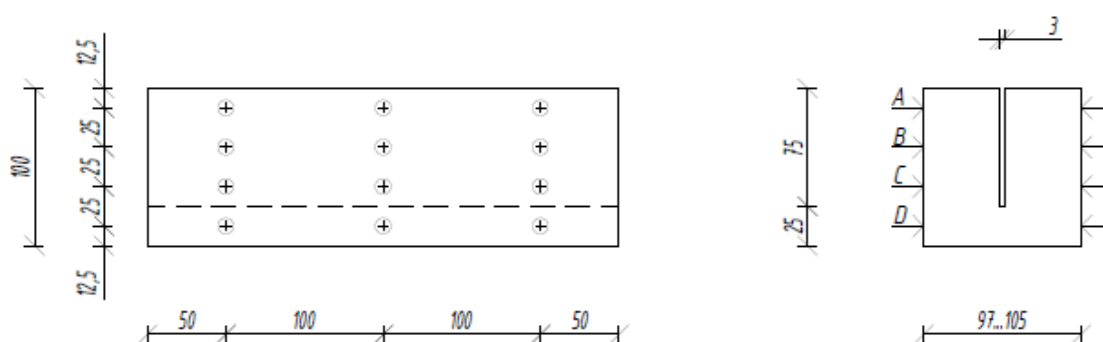
Kõigepealt lõigati pikast saematerjalist välja 7 männist ja 7 kuusest 30 cm pikkust katsekeha. Katsekehadest valiti mõlemast liigist 5 eksemplari, millele lõigati ketassaega 3 mm paksune ja 75 mm sügavune pragu (vt joonis 14). Kaks katsekeha mõlemast liigist jäeti terveks.

Männi terved katsekehad tähistati MT1 ja MT2 ning praoga M1...M5.

Kuuse terved katsekehad tähistati KT1 ja KT2 ning praoga K1...K5.

### 2.4.2. I-rühma mõõtmised

Igale katsekehale märgiti peale mõõtmiste asukohad (vt joonis 17) ning need rühmitati 4 erinevasse gruppi, vastavalt prao sügavusele mõõtmiskohast, ülevalt alla: 62,5 mm, 37,5 mm, 12,5 mm ja ilma praota. Mõõtmiskohti katsekeha pikisuunas omakorda 3 erineval kaugusel, seega igal katsekehal 12 mõõtmiskohta. Järelikult praoga katsekehadel vastavalt 60 ja tervetel katsekehadel 24 mõõtmist, mõlema liigipeale kokku 168 mõõtmiskohta (vt joonis 19).

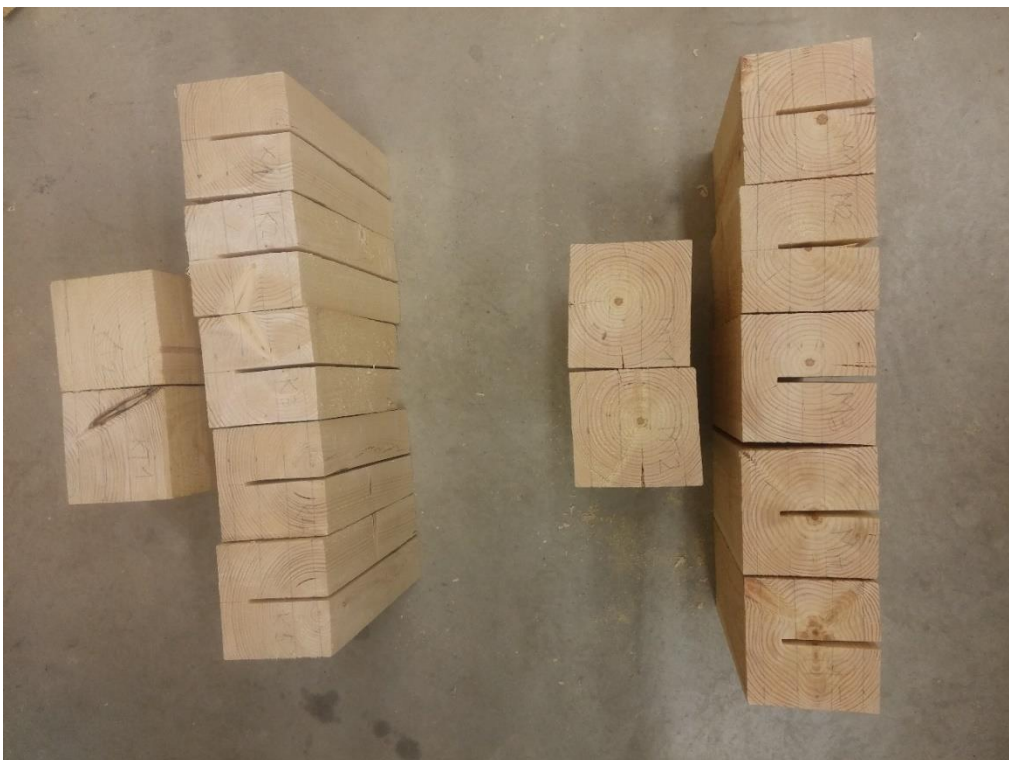


**Joonis 17.** Vasakulpool on sisselõikega katsekeha mõõtmiskohtade paiknemine külgvaates, parempoolsel joonisel on kujutatud ristlõige prao paiknemisega ja prao põhja kaugustega mõõtmiskohatadest: A- 62,5 mm; B- 37,5 mm; C- 12,5 mm ning D- pragu eemal 12,5 mm

Kõigepealt kontrolliti puidu niiskussisaldusi, mis jäid kõik vahemikku 16-18%, niiskussisaldusi järgnevates analüüsides ei käsitleta. Helilevimiskiiruse mõõtmiseks on vaja teada teepikkust ja aega. Distanti mõõtmiseks kasutati *Scala* digitaalset nihkkaliibrit, sellega mõõdeti neljale mõõtmiskõrgusele mõlema otsa keskmine paksus. Heli levimisaeg saadi kasutades seadet *Fakopp Microsecond Timer*. Saadud andmed kanti *Microsoft Excel* programmi, kus teepikkuse tulemused jagati vasta koha heli levimise ajaga ning saadi heli levimise kiirused, mida antud töös hiljem analüüsitakse suhtes prao sügavusega.



**Joonis 18.** Peale märgitud mõõtmiste asukohad külgsuunas



**Joonis 19.** I-rühma kõik ette valmistatud katsekehad, vasakul pool 2 tervet ning 5 pragudega kuusest eksemplari, paremal pool 2 tervet ning 5 pragudega männist eksemplari

### 2.4.3. II-rühma katsekehade hankimine ja töötlemine

Teise rühma katsekehad toodi lagunenenud vanadest hoonetest (vt joonis 20) kokkuleppel omanikega, täpsed rajamise kuupäevad teadmata, kuid mitte hiljem kui 1950. aastaid. Samuti toodi üks katsekeha ka *OÜ Karimek* puitjäätmete kogumispunktist (vt joonis 21), mille päritolu on teadmata. Kõik kogutud katsekehad toodi EMÜ MMI konstruktsioonide laborisse, kus toimus edasine detailide sorteerimine, töötlemine ja katsetamine.

Kahjustustega detailide pikkused varieerusid algselt 30 cm kuni 150 cm. Need lõigati kõik *Makita* saepingiga lühemateks juppideks vahemikus 20 kuni 40 cm, paksused varieerusid kuuse eksemplaridel 120 cm kuni 207 cm ning männil 101 kuni 210 cm (vt joonis 22). Lõplikult valituks ostunud männi katsekehad kodeeriti vastavalt:

1. MMK1; 2. MMK1; 3. MMK1; 4. MMK1; 1. MMK2; 2. MMK2; 1. MMK3; 2. MMK3; 3. MMK3 ja MMK4 ning kuuse omad järgnevalt:

1. KMK1; 2. KMK1; 3. KMK1; 4. KMK1; 1. KMK4; 2. KMK4; 3. KMK4; KMK 6; 1. KMK7; 2. KMK7; 3. KMK7; 4. KMK7; 5. KMK7; 6. KMK7; 7. KMK7; 1. KMK8; 2. KMK8; 3. KMK8; 4. KMK8; 1. KMK9; 2. KMK9; 3. KMK9.

Detaili koodi tõlgendamine: nt: 6. KMK7

(esimene number) 6.-näitab, et tegemist on samast detailist lõigatud 6.nda jupiga ühest ja samast katsekehast;

(lühend) KMK- näitab, et tegemist on kuusepuiduga;

(viimane number) 7- näitab, et tegemist on 7. tervikliku katsekehaga.

Pärast tükeldamist saadi seega 10 männist katsekeha ning kuusest 22 katsekeha.





**Joonis 20.** Erinevatest kohtadest hangitud katsekehad varieeruvate kahjustusulatustega



**Joonis 21.** Jäätmekäitlusplatsilt leitud katsekeha, vasakul pool katsekeha külgsaade ning paremal kahjustunud ristlõiked pärast tükeldamist



**Joonis 22.** II- rühma kõik ettevalmistatud kahjustustega katsekehad

#### **2.4.4. II-rühma mõõtmised**

Pärast katsekehade tükkideks lõikumist määrati võimalikult erinevate kahjustuse ulatustega ristlõiked, kuskohast ka edaspidised mõõtmised tehti. Mõõtmise asukohad markeeriti detailil pikisuunas numbriliselt ning ristlõikel paiknemisel tähestikulises järjekorras vasakult paremale vastavalt A, B ja C ning ülevalt alla D, E ja F (vt joonis 23).

Katsekehadele määrati puidu niiskussisalduste väärtused grupi kaupa ning mõõtmised teostati puidu terves osas kasutades niiskusemõõturit *Brookhuis FME*. Männi niiskussisaldused jäid vahemikku 16,5-21,9% ning kuuse omad 14,6-17,1%. Niiskussisalduse erinevust edaspidi käsitleda pole vaja, sest varieeruvus on piisavalt väike, mis ei oma määravat rolli tulemustes. Küll aga on katsekehade grupi KMK1 niiskussisaldus oluliselt kõrgem (32,9%), mis vajab eraldi kontrolli.





**Joonis 23.** Katsekeha mõõtmisasukohtade markerimine; numbrid 1, 2 ja 3 näitavad ristlõike asukohta detaili pikisuunas; tähed A, B ja C (antud joonisel puudub) - kõrguse suunas mõõtmist; tähed D, E ja F – laiuse sihis mõõtmist

Edaspidi teostati kõikides märgitud kohtades; heli levimisaja ja ristlõike paksuse mõõtmised, vastupanu puurimised, ning visuaalsed vaatlused kahjustuste ulatuste hindamiseks.

Mõõtmiskohtade teepikkuste väärtused mõõdeti välja kasutades *Scala* digitaalset nihkkaliibrit. Peale seda mõõdeti kõikidele vastavatele kohtadele heli levimise ajad seadmega *Fakopp Microsecond Timer*. Andmed kanti *Microsoft Excel*'i tabelisse ning seejärel sama programmiga arvutati helilevimise kiirused jagades teepikkused ajaga.

Järgnevalt teostati samadest kohtadest (2-5 mm eelneva mõõtmiskoha süviku kõrvalt, et vältida selle mõju graafikule) resistograafia *Restistograph® 4453-P* puurimised. Kuna puur on väikse diameetriga võib see soovitud teekonnalt kõrvale kalduda, seega jälgiti alati kas puur tuli välja õigest kohast. Resistograafi manuaalsed graafiku väljatrükid säilitati, graafiku juures oli puurimise number ning see seoti detaili numbri ja asukohaga. Lisaks salvestati graafikud arvutisse edaspidiseks võrdluseks ja analüüsiks.

Analüüsiks on võimalik kaks erinevat meetodit kas kasutada tootjapoolset tarkvara *DECOM* või siis kanda andmestik *Microsoft Excel*'i tabelisse ja seda siis seda oma soovi järgi analüüsida. Autor kasutas täpsuse ning objektiivsuse huvides viimast programmi. Kuna *DECOM* programmis tuleb graafikud kahjustuse järgi ise käsitsi manuaalselt märkida siis on see viis vägagi subjektiivne ning ei ole sobilik teaduslikus uurimuses.

Graafikute võrdluspõhiseks muutmiseks tuleb teha palju eeltööd. Kõigepealt lõigati kõikidest graafikutest maha esimesed 8 mm, kuna puur siseneb puitu alles 8. millimeetri möödudes. Graafikute lõpp lõigati maha kohast, kus tekkis järsk suhtelise vastupanu väärtuse trendi järsk langus enne vastupanu kadumist/ stabiliseerumist. Järgnevalt koostati *Microsoft Excel*'is graafikud x-teljel puurimissügavus (0,1mm täpsusega), y-teljel puuri suhteline vastupanu väärtus. Edasine protsess andmetega ja analüüs on kirjeldatud tulemuste peatükis.

Kolmandaks hindamiseks oli visuaalne kahjustuse hindamine. Kuigi visuaalne vaatlus kuulub üldjuhul mittepurustavate meetodite juurde siis käesolevas töös võib seda nimetada purustavaks meetodiks. Seda põhjusel, et eelnevate heli levimisaja mõõtmise ja vastupanu puurimise kohtadest lõigatakse katsekeha täpselt *Makita* ketassaega pooleks. Seda eesmärgil, et mõõta visuaalse kahjustuse osa ulatus joonlauaga ning see järel määrata ristlõike visuaalse kahjustuse osakaal. Seda saab hilisemalt siis võrrelda resistograafi ning *Fakopp*'i tulemustega. Teiseks saame me mittepurustavate meetodite sooritamise täpsest asukohast reaalse pildi, milline kahjustus välja näeb. See annab võimaluse analüüsida tulemusi katsekeha põhiseelt see vajadus võib tekkida eelkõige erandite puhul.

## 2.5. Kahjustunud katsekehade uurimise töökäik

Mõõtmistulemuste kirjeldus ühe katsekeha (vt tabel 9) näitel. Antud juhul on tegemist KMK7 detaili 2. lõikega. Kuhu on peale märgitud mõõtmispuunad 1A kuni 1F. Resistograafi graafikud on salvestatud koodide alla 5447 kuni 5452. 4.ndas veerus on toodud resistograafi suhtelised vastupanud, mida otseselt kohe kasutada ei saa. Järgmisega on toodud väärtus alla keskmise resistograafi näidu kõikidest kuusepuidust detailide peale kokku.

Tuletatud väärtus resistograafi graafikust alla 85% keskmistest annab ka juba paremaid tulemusi, kui eelnevad kaks veergu. Parimaid tulemusi resistograafi väärtuste tõlgendamiseks annab aga alla 90% keskmisest allapoole jäävate väärtuste osakaal (vt joonis 24). Tabelis annab sellest aimu 7. ja 9. (visuaalse vaatluse kahjustuse osakaal %) veeru kõrge seos. Viimased kaks mainitud on hästi avaldatavad funktsioonidega (vt peatükk 3.4 ja peatükk 3.3), kus muutujaks ongi helikiirus tabelis 8. veerus.

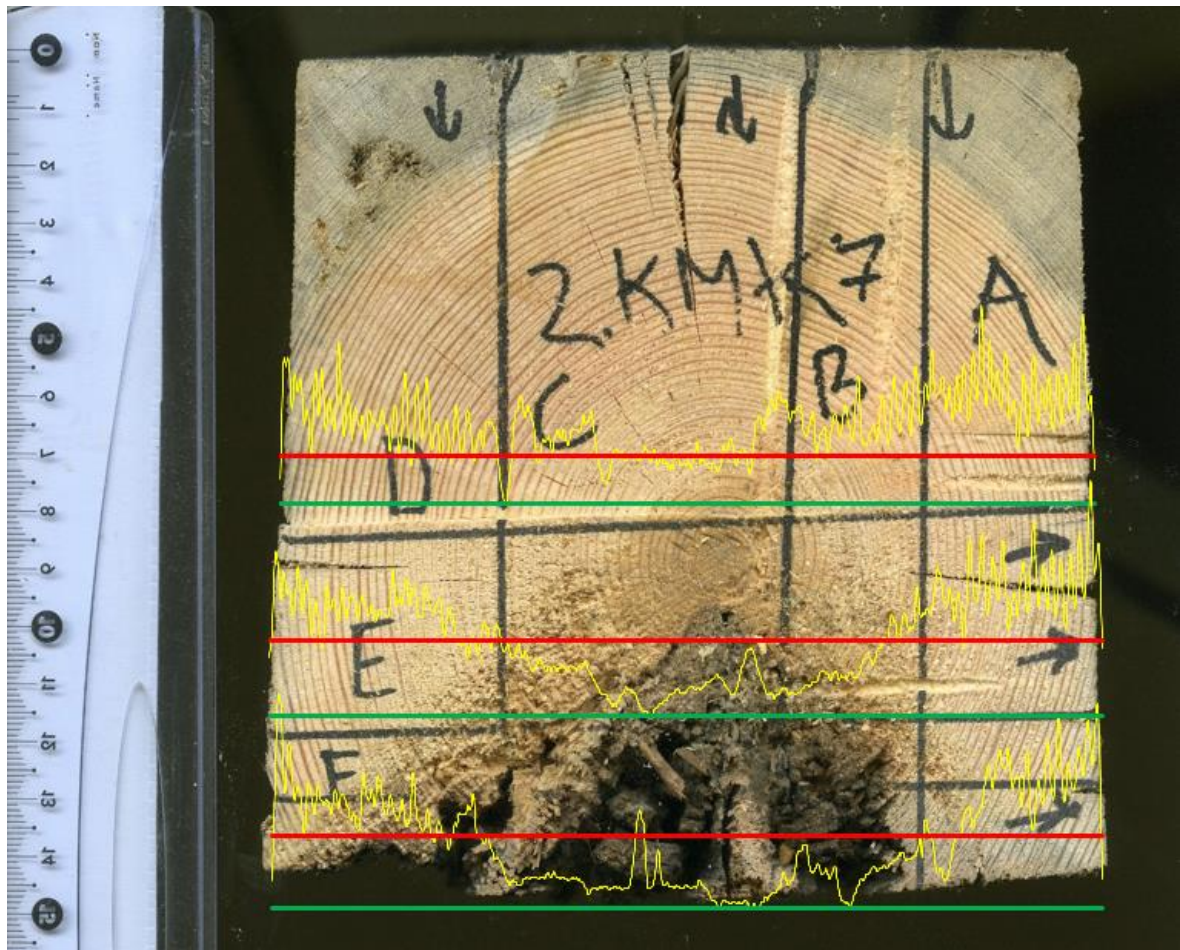
**Tabel 9.** Joonis 26 lõikes 2.KMK7 teostatud mõõdistamiste tulemuste väljavõte ( vt Lisa 4). Värvikaardistus on tehtud veeru kaupa (6,7,8,9), kus on kasutatud *Microsoft Exceli* tingimusliku vorminduse rohelise-kollase-punase värvi vahemikku. 8. veerus kõrgemad väärtused rohelisega, 6.,7. ja 9. veerus vastupidi kõrged väärtused punasega.

1	2	3	4	5 (%)	6 (%)	7 (%)	8 (m/s)	9 (%)	10 (mm)	11 (mm)	12 (mm)
2.KMK7	1A	5447	123,2	36	15	22	865	20	30	148	148,4
2.KMK7	1B	5448	112,7	63	31	41	488	41	60	148	148,3
2.KMK7	1C	5449	123,4	28	10	18	913	21	30	146	147,3
2.KMK7	1D	5450	122	42	3	15	1220	10	15	150	149,5
2.KMK7	1E	5451	108,2	60	43	50	817	53	80	152	151,8
2.KMK7	1F	5452	103,9	70	53	57	617	69	105	153	153,5

Märkused: Tabeli veerud on tähistatud järgmiselt:

1. detaili kodeering
2. mõõtmise asukoht,
3. resistograafi kood,
4. resistograafi suhteline vastupanu,
5. protsent alla resistograafi keskmise väärtuse,
6. protsent alla resistograafi 85%-sest keskmisest väärtusest,
7. protsent alla resistograafi 90%-sest keskmisest väärtusest,
8. helikiirus,
9. visuaalne kahjustunud osa,
10. visuaalne kahjustus,
11. uuritava külje pikkus,
12. resistograafi graafiku pikkus.

10. veerg näitab visuaalse kahjustuse ulatuse pikkust. Visuaalse kahjustuse osakaalu (9. veerg) teada saamiseks kasutati just absoluutse pikkuse (11. veerg) jagatist kahjustuse pikkusesse (10. veerg). 12. veerg on resistograafi vastupanu puurimise teepikkus, mis sisuliselt on dubleering 11. veeru teepikkusele. Ent viimane on vajalik just resistograafi puuri teekonna pikkuse kontrollimiseks. Kui erinevus on liialt suur ehk üle 5 mm, siis on puur oluliselt oma teekonnalt kõrvale kaldunud.



**Joonis 24.** Kollased jooned on resistograafi suhtelise vastupanu graafikud mõõtmiskohtadest 1D, 1E ja 1F. Punased jooned näitavad kuuse kõikide katsekehade keskmise suhtelise vastupanu 90% väärtust (106,9). Rohelised jooned näitavad graafiku miinimumväärtuste piiri (vt tabel 9)

## 2.6. Statistiline andmetöötlus

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli välja selgitada heli levimise kiirused terves puidus erinevates puuliikides ristikiudu erinevate kahjustusastmete juures. Heli levimise aega, resistograafi väärtuseid ja visuaalse kahjustuse ulatust vaadeldi kui üksteisest sõltuvaid tunnuseid ja püüti kirjeldada nende omavahelise seose suurust.

Matemaatilises statistikas lähtutakse reaalistest mõõtmistulemustest ja tehakse nende põhjal järeldusi uuritava objekti kohta; käsitletakse meetodeid, kuidas katsete ja mõõtmiste tulemuste põhjal iseloomustada uurimisobjekti ja teha tema kohta võimalikult objektiivseid ja usaldusväärseid järeldusi [22].

Katsetulemuste analüüsiks kasutati arvutiprogrammi *Microsoft Excel*, kuhu sisestati andmed ja milles teostati tunnuste kirjeldav statistiline uuring, kasutades karp-, hajuvus- ja sagedusdiagramme, regressioonianalüüsi tunnuste vaheliste seoste kirjeldamiseks.

Tunnuste omavaheliste seoste iseloomustamiseks kasutati järgnevaid statistilisi näitajaid [22]:

- determinatsioonikordaja  $R^2$  — iseloomustamaks, kui suur osa funktsioontunnuse varieeruvusest (hälvete ruutude summast) kirjeldatakse regressioonivõrrandiga;
- $p$  — väärtus e. olulisuse tõenäosus – näitab, kas prognoosivõrrand on statistiliselt oluline (kui  $p$  on väiksem 0,05, siis on oluline);

Katsetulemuste uurimisel kasutati erinevaid diagramme kirjeldatuna järgnevalt [23]:

- karpdiagramm — näitab tunnuse jaotust. Ruut näitab 25% ja 75% kvantiile, keskmine joon ruudu sees näitab mediaani;
- hajuvus- ehk punktdiagramm — näitab kahe tunnuse vahelist sõltuvust.

Kusjuures kõik töös olnud analüüsid osutusid statistiliselt olulisteks see tähendab, et  $p$  väärtus oli neil väiksem kui 0,05.

Seoste tugevuse hindamiseks on määratud kokkuleppelised piirid [23]:

- 0,3 – nõrk seos;
- 0,7 – tugev seos.
- 0,3-0,7 – keskmine seos

### 3. TULEMUSED JA ARUTELU

#### 3.1. Pragude mõju heli levimise kiirusele

Tabelis 10 on toodud heli levimiskiiruste statistilised karakteristikud, kus on selgelt näha kuidas helilevimise kiirus sõltub prao sügavusest (mõõtmiskohast). Nähtub, et helilevimise kiirusele avaldab mõju ka see kui mõõtmine oli tehtud prao kõrvalt, see ilmneb kui tulemust võrrelda täiesti terve katsekeha kiirusega. Ilma sisselõiketa ekspemplaride keskmine on Fakoppi juhendi [18] väärtusele sarnane ning mood on täpselt juhendi soovitusliku männipuidu väärtusega (1470 m/s) võrdne. Terve katsekeha heli levimiskiirus on peaaegu 2 korda suurem, kui 62,5 mm prao sügavusel mõõtes.

**Tabel 10.** Heli levimiskiiruste statistilised näitajad männipuidu puhul erinevatest mõõtmiskohtadest

Mõõtmiskoht/ Karakteristik	A (m/s)	B (m/s)	C (m/s)	D (m/s)	E (m/s)
Keskmine	784,2	934,0	1243	1365	1507
Standardviga	10,48	13,09	14,00	14,89	23,34
Mediaan	777,8	919,6	1226	1365	1481
Mood	764,7	981,0	1198	1365	1470
Standardhälve	40,60	50,71	54,23	57,66	80,86
Miinum	707,5	859,5	1184	1272	1406
Maksimum	859,5	1040	1342	1471	1635

Märkused: prao sügavus A- 62,5 mm; prao sügavus B- 37,5 mm; prao sügavus C- 12,5 mm, D- pragu eemal 12,5 mm ja E- ilma praota).

Tabelist 11 nähtub, et heli levimise kiirused suurenevad prao sügavuse kasvades. Erinevalt männist ei saa kuusepuhul nii kindlalt väita, et prao kõrvalt tehtud katse oleks helikiirust mõjutanud võrreldes täiesti terve eksemplariga. Sisselõike kõrvalt mõõdetud keskmine on Fakoppi juhendi arvutuslikule väärtusele väga sarnane, kus juhendi väärtus (1310 m/s) [18]. Sügava praoga katsekeha helilevimise kiirus on 37% madalam tervest katsekehast. Kõikidel juhtudel joonistub välja, et kuuse helikiiruse tulemusi mõjutavad praod vähem.



**Tabel 11.** Heli levimiskiiruste statistilised näitajad kuuse puidu puhul erinevatest mõõtmiskohtadest

Mõõtmiskoht/ Karakteristik	A (m/s)	B (m/s)	C (m/s)	D (m/s)	E (m/s)
Keskmine	859,3	921,5	1208	1324	1365
Standardviga	9,431	9,587	15,48	9,708	47,72
Mediaan	863,2	927,3	1214	1320	1327
Mood	901,8	942,9	1190	1289	1259
Standardhälve	36,53	37,13	59,95	37,60	165,3
Miinumum	804,9	850,0	1042	1259	1186
Maksimum	901,8	961,5	1303	1370	1683

Märkused: prao sügavus A- 62,5 mm; prao sügavus B- 37,5 mm; prao sügavus C- 12,5 mm, D- pragu eemal 12,5 mm ja E- ilma praota).

Tabelisse 12 on koondatud helilevimise kiiruste lang vastavalt prao sügavuse suurenemisele. Tekib arusaadav trend prao sügavuse mõju kohta helilevimise kiirusele. Tuleb aga tähele panna, et pragu laius 62,5mm võib aga võimalikuks osutuda alles suuremate kui 150 mm ristlõike mõõtudega detailidel. Helilevimise kiirusele on prao mõju suurem männipuidule kui kuusepuidule. Märkimisväärne helilevimise kiiruse muutus toimub just prao laiuselt 37,5mm kuni 12,5mm männis 21,5% võrra ning kuuses 20,9%. Olukorda, kus prao laius on 12,5 mm võib sagedasti ette tulla ning see mõjutab männil helilevimise kiirust lausa 17,6% ning kuusel 11,5%.

**Tabel 12.** Prao mõju heli kiirusele ning resistograafi arvutuslikule väärtusele

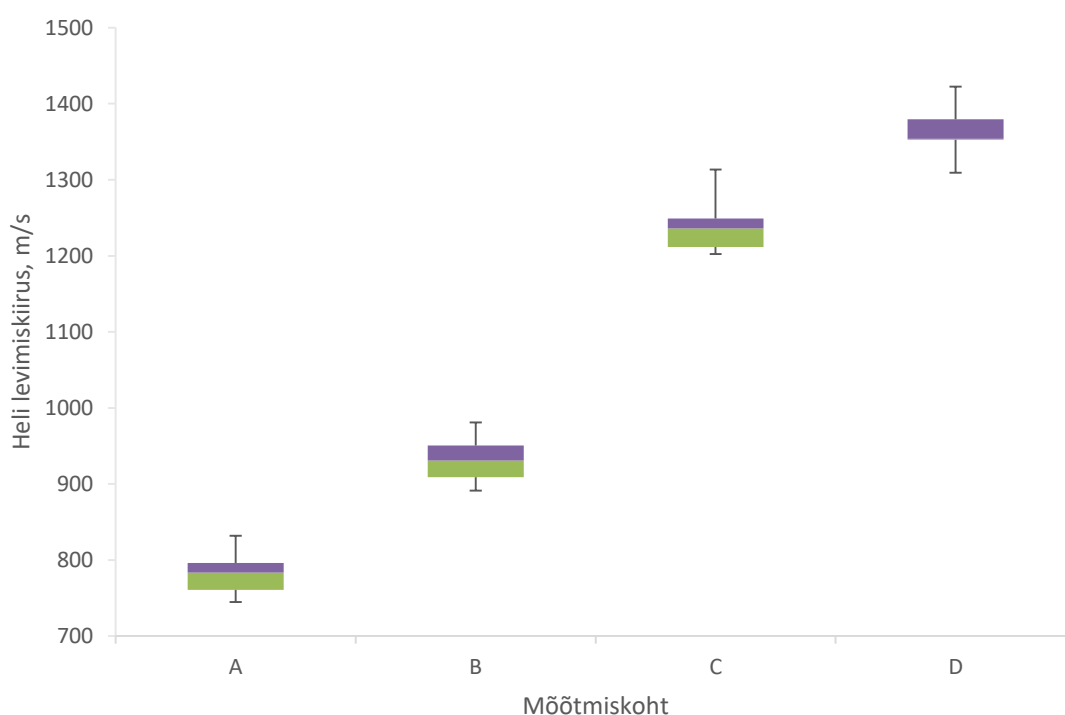
Mõõtmiskoha lühend	Prao sügavus (mm)	Mänd		Kuusk	
		kiiruse langus %	visuaalse kahjustuse osakaal %	kiiruse langus %	visuaalse kahjustuse osakaal %
			$y = -0,0483x + 77,395$		$y = -0,0429x + 67,828$
A	62,5	48,0	35,9	37,0	34,2
B	37,5	38,1	32,9	32,4	27,8
C	12,5	17,6	19,1	11,5	14,5
D	0	9,5	13,5	2,9	9,3

Fakopp juhend näeb ette 10% helikiiruse kahanemise juures kahjustuse ulatust 15-25% vahemikus.

Visuaalset kahjustust hindav võrrand kirjeldab näiteks kuusepuidus ja männipuidus olevat 62,5 mm sügavust pragu vastavalt 34,2% ja 35,9% kahjustuse ulatusega ning 12,5 mm sügavust pragu aga vastavalt 11,5% ja 17,6%. Siinkohal tuleb meelde tuletada, et kahjustuse tegelik ulatus läbilõikes on vaid 3 %. Järelikult võivad pragude esinemise korral muutuda

heliikiirusest tulenevad kahjustuse prognoosvõrrandid mitte rakendatavateks. Lisaks on pragude mõju helikiirusele pigem funktsioon prao laiusest kui selle paksusest. Paraku kahjustuse ulatus ongi just viimaste regressioonvõrranditega kirjeldatud, mis arvestavad selle osakaalu paksusest.

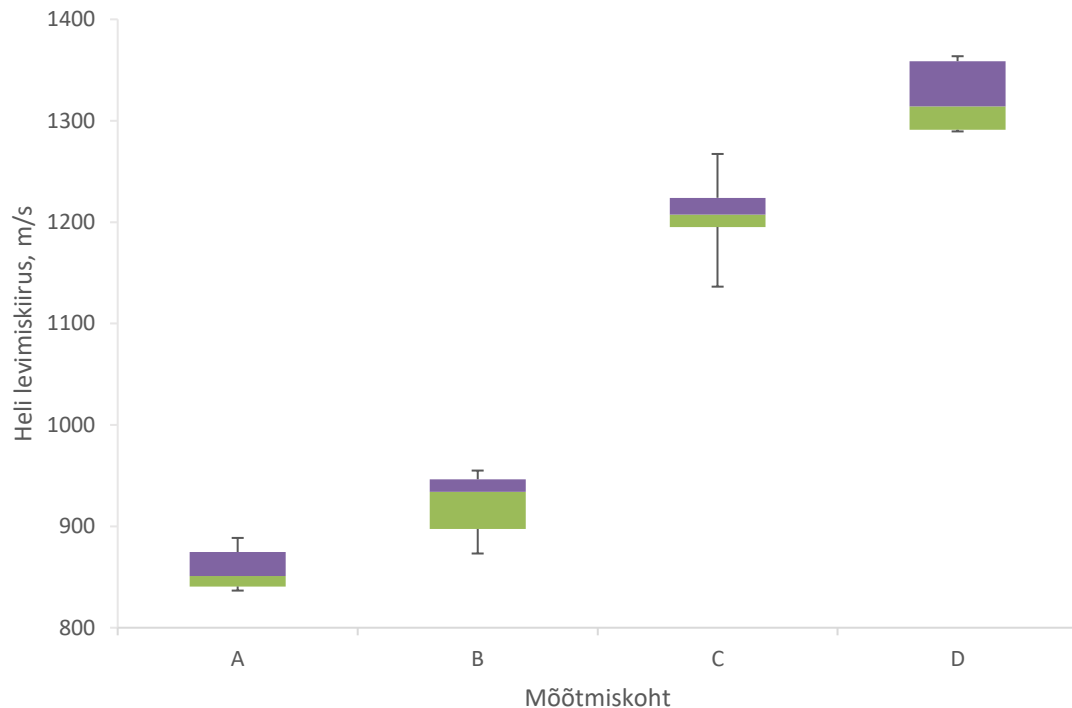
Männipuidu puhul joonistub välja peaaegu lineaarne trend mõrade valitud piirkonnas (vt joonis 25). Kvantiilide vahed on väga väikesed seega on tulemused vähe hajuvad ning usaldusväärsed. Heli levimiskiirused langevad selgelt prao sügavuse kasvades.



**Joonis 25.** Heliikiiruste karpdiagramm erinevates mõõtmiskohtades männipuidus sõltuvalt prao sügavusest: A- pragu sügavusega 62,5 mm, B- pragu sügavusega 37,5 mm, C- pragu sügavusega 12,5 mm, E- prao kõrvalt 12,5 mm

Kuusepuidu karpdiagrammilt (vt joonis 26) võib näha, et hajuvus on väike vaid C-grupi puhul ning väga kõrge D- grupi puhul. Samuti ei teki gruppide vahel nii selget lineaarset trendi, vaid hoopis kujuneb kahe suurema sügavusega prao (A ja B) ja C lühikese vahel suur astang. Kuid üldiselt siiski heli levimiskiirus langeb vastavalt prao sügavuse suurenemisele.





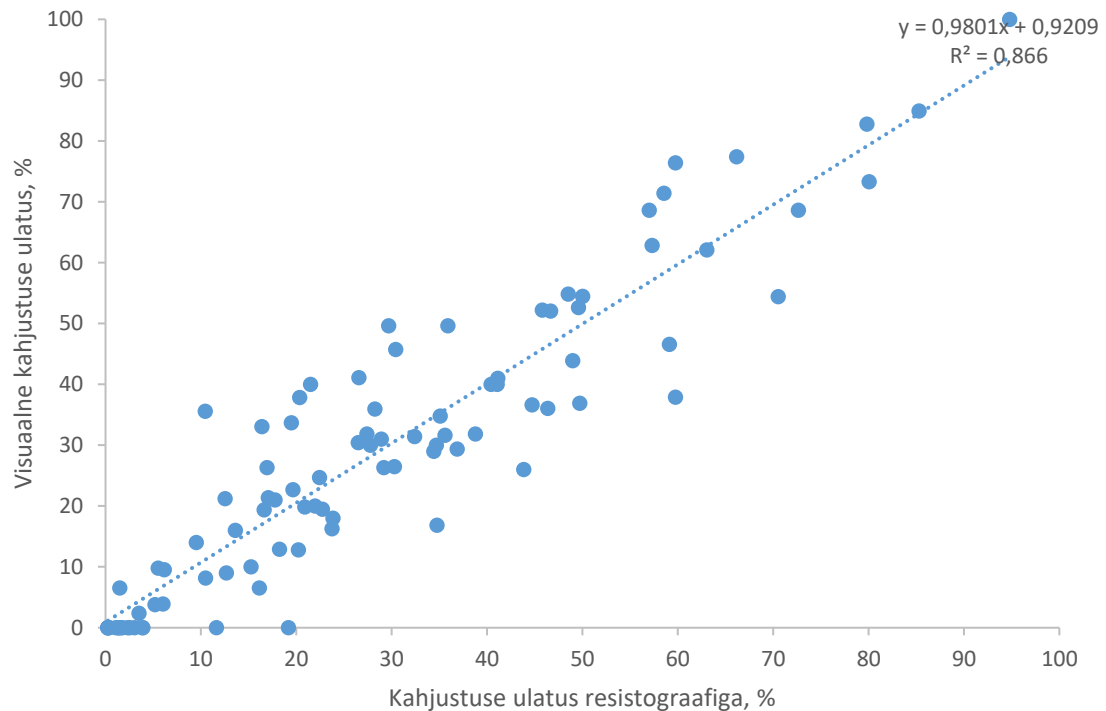
**Joonis 26.** Heliikiiruste karpdiagramm erinevates mõõtmiskohtades kuusepuidus sõltuvalt prao sügavusest : A- prao sügavusega 62,5 mm, B- prao sügavusega 37,5 mm, C- prao sügavusega 12,5 mm, E- prao kõrvalt 12,5 mm

## 3.2. Visuaalse kahjustuse ja resistograafi vastupanu seos

### 3.2.1. Kuusk

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 27) kujutatud mudel kirjeldab ära 86,6% (determinatsioonikordaja  $R^2=0,866$ ) visuaalse kahjustuse tegelikust varieeruvusest. Visuaalse kahjustuse/tegeliku kahjustuse ulatuse prognoosimiseks kasutades resistograafi alla 90% keskmise väärtuste suhet kirjeldab regressioonvõrrand:

$y=-0,9801x+0,9209$ . Antud mudel põhineb 20-l radiaalsel ja 75-l tangentsiaalsel mõõtmistulemusel. Üle kõigi tulemuste korrelatsioonikordaja on  $r=0,93$  (vt lisa 8) mis vastab väga tugevale seosele.

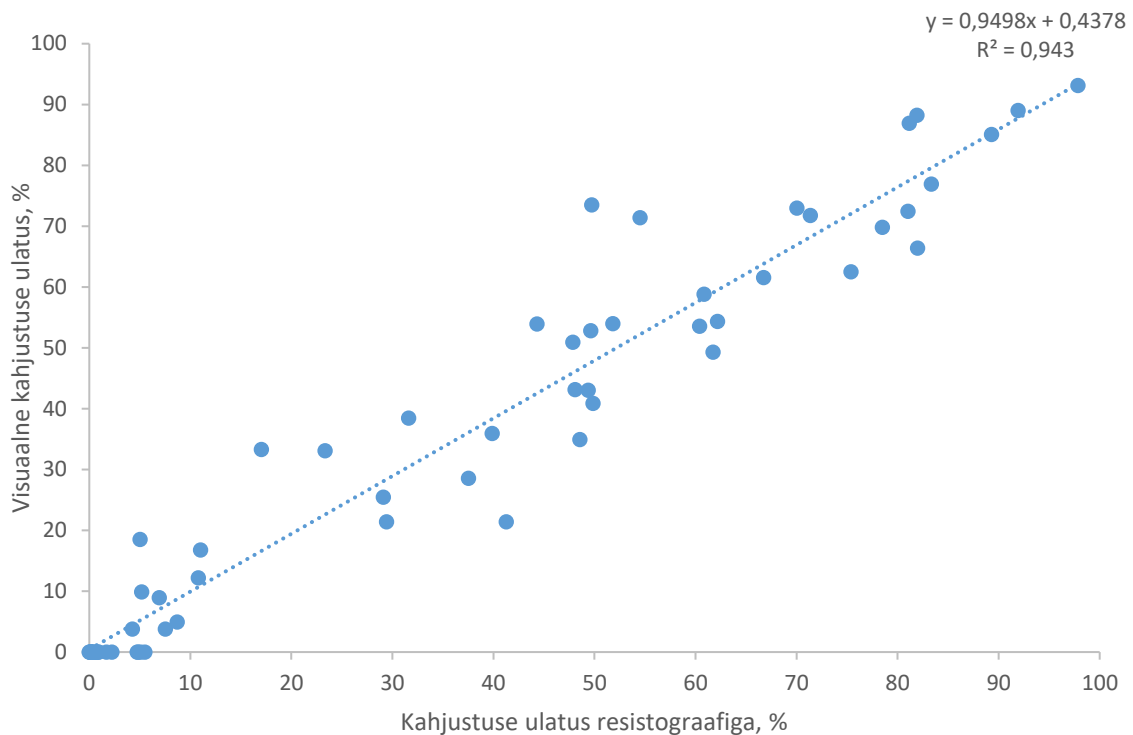


**Joonis 27.** Kuusest katsekehades (tangensiaal- ja radiaalsuund) visuaalse kahjustuse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm

### 3.2.2. Mänd

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 28) kujutatud mudel kirjeldab ära 94,3 % (determinatsioonikordaja  $R^2=0,943$ ) visuaalse kahjustuse tegelikust varieeruvusest. Visuaalse kahjustuse/tegeliku kahjustuse ulatuse prognoosimiseks kasutades resistograafi alla 90% keskmise väärtuste suhet kirjeldab regressioonvõrrand:

$y = -0,9498x + 0,4378$ . Antud mudel põhineb 16-l radiaalsel ja 47-l tangensiaalsel mõõtmistulemusel. Üle kõigi tulemuste on korrelatsioonikordaja  $r=0,97$  (vt lisa 11) mis vastab väga tugevale seosele.



**Joonis 28.** Männist katsekehades (tangensiaal- ja radiaalsuund) visuaalse kahjustuse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm

### 3.3. Helikiiruse ja visuaalse kahjustuse vaheline seos

#### 3.3.1. Kuusk

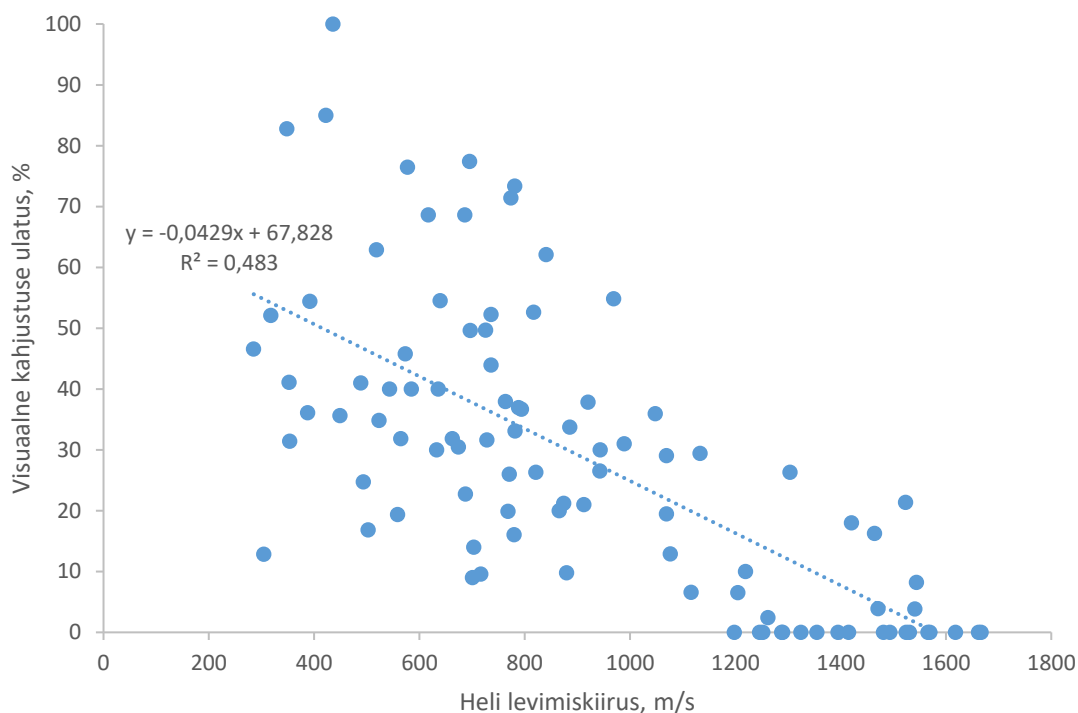
Alljärgnevalt analüüsitakse kõigepealt mõõtmise suundasid eraldi ning seejärel üheskoos, viimasest olukorrast saadakse lõplik prognoosvõrrand.

Radiaalsuunas on vaatluste arv 20, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,63$  (vt lisa 6) ehk kehtib keskmine seos. Tangensiaalsuunas on vaatluste arv 75, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,72$  (vt lisa 7) ehk kehtib tugev seos.

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 29) kujutatud mudel kirjeldab ära 48,3% (determinatsioonikordaja  $R^2=0,483$ ) helikiiruste tegelikust varieeruvusest. Kahjustuse ulatuse prognoosimiseks helikiiruse abil on sobilik regressioonvõrrand:

$y=-0,0429x+67,828$ . Antud mudel põhineb 20-l radiaalsel ja 75-l tangensiaalsel mõõtmistulemusel. Üle kõigi tulemuste korrelatsioonikordaja on  $r=-0,69$  (vt lisa 8) mis

vastab keskmisele seosele. Lõplik regressioonvõrrand arvestab mõlema sihi vaatlusi koos praktilisest rakendamise aspektist.



**Joonis 29.** Kuusest katsekehades (tangentsiaal- ja radiaalsuund) heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm

### 3.3.2. Mänd

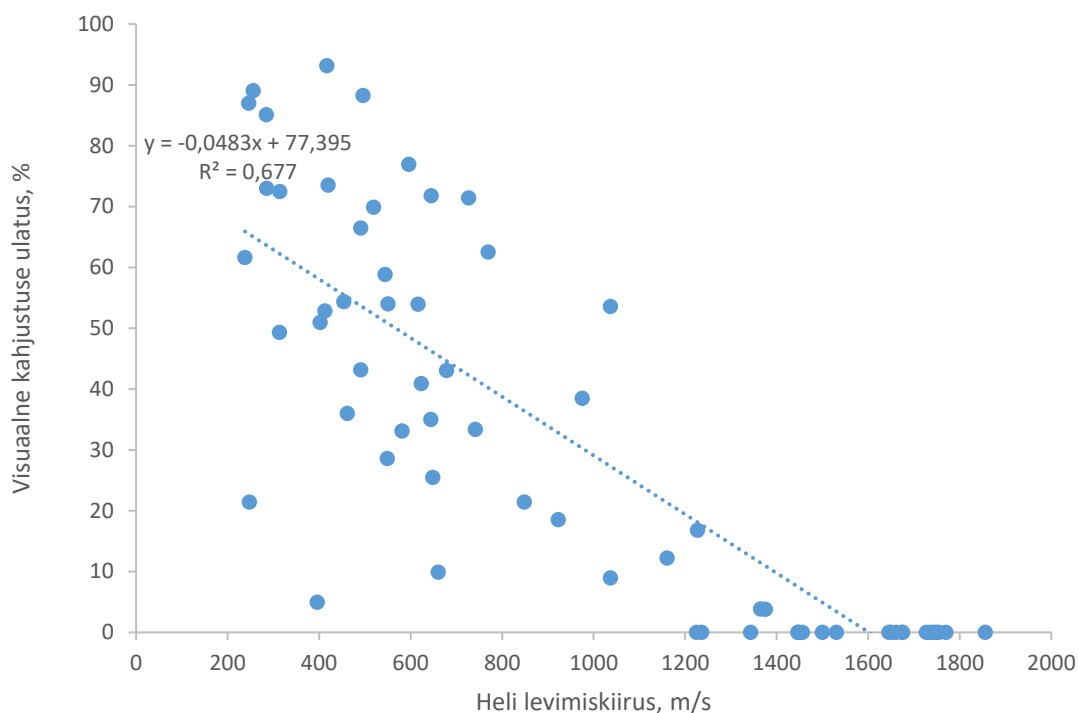
Alljärgnevalt analüüsitakse kõigepealt mõõtmise suundasid eraldi ning seejärel üheskoos, viimasest olukorrast saadakse lõplik prognoosvõrrand.

Radiaalsuunas on vaatluste arv 16, korrelatsioonikordaja on  $r=0,80$  (vt lisa 9) ehk kehtib tugev seos. Tangentsiaalsuunas on vaatluste arv 47, korrelatsioonikordaja on  $r=0,82$  (vt lisa 10) ehk kehtib tugev seos.

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 30) kujutatud mudel kirjeldab ära 67,7% (determinatsioonikordaja  $R^2=0,677$ ) helikiiruste tegelikust varieeruvusest. Kahjustuse ulatuse prognoosimiseks helikiiruse abil on sobilik regressioonvõrrand:

$y=-0,0483x+77,395$ . Antud mudel põhineb 16-l radiaalsel ja 47-l tangentsiaalsel mõõtmistulemusel. Üle kõigi tulemuste on korrelatsioonikordaja  $r=0,82$  (vt lisa 11) mis

vastab tugevale seosele. Lõplik regressioonvõrrand arvestab mõlema sihi vaatlusi koos praktilisest rakenduslikust aspektist.



**Joonis 30.** Männist katsekehades (tangentsiaal- ja radiaalsuund) heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm

### 3.4. Heliikiiruse ja resistograafi vastupanu seos

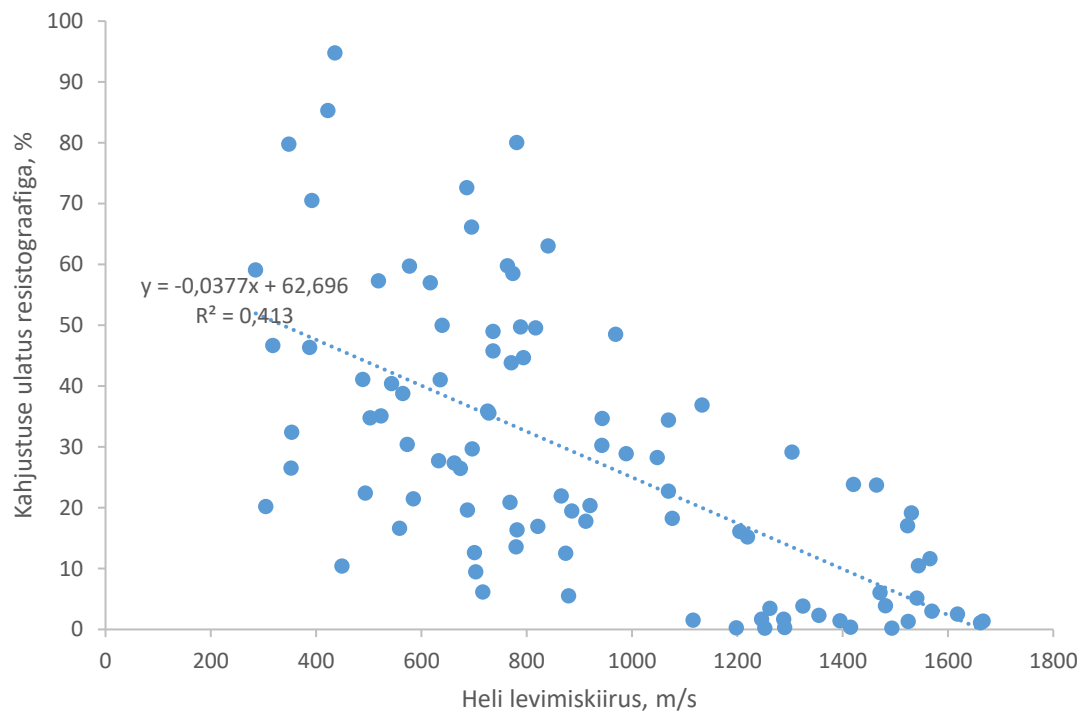
#### 3.4.1. Kuusk

Alljärgnevalt analüüsitakse kõigepealt mõõtmise suundasid eraldi ning seejärel üheskoos, viimasest olukorrast saadakse lõplik prognoosvõrrand. Võrdluses on *Fakopp* 'iga abil saadud helilevimise kiirused ja resistograafi vastupanu väärtused. Kusjuures resistograafi vastupanu väärtused on kõikide kuusest katsekehade 90% keskmisest allapoole jäävate väärtuste osakaal.

Radiaalsuunas on vaatluste arv 20, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,69$  (vt lisa 6) ehk kehtib keskmine seos. Tangentsiaalsuunas on vaatluste arv 75, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,64$  (vt lisa 7) ehk kehtib keskmine seos.

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 31) kujutatud mudel kirjeldab ära 41,3% (determinatsioonikordaja  $R^2=0,413$ ) helikiiruste tegelikust varieeruvusest. Kahjustuse ulatuse prognoosimiseks helikiiruse abil on sobilik regressioonvõrrand:

$y = -0,0377x + 62,696$ . Antud mudel põhineb 20-l radiaalsel ja 75-l tangentsiaalsel mõõtmistulemusel. Üle kõigi tulemuste on korrelatsioonikordaja  $r = -0,64$  (vt lisa 8) mis vastab keskmisele seosele. Lõplik regressioonvõrrand arvestab mõlema suuna vaatlusi koos praktilisest aspektist.



**Joonis 31.** Kuusest katsekehades (tangentsiaal- ja radiaalsuund) heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm

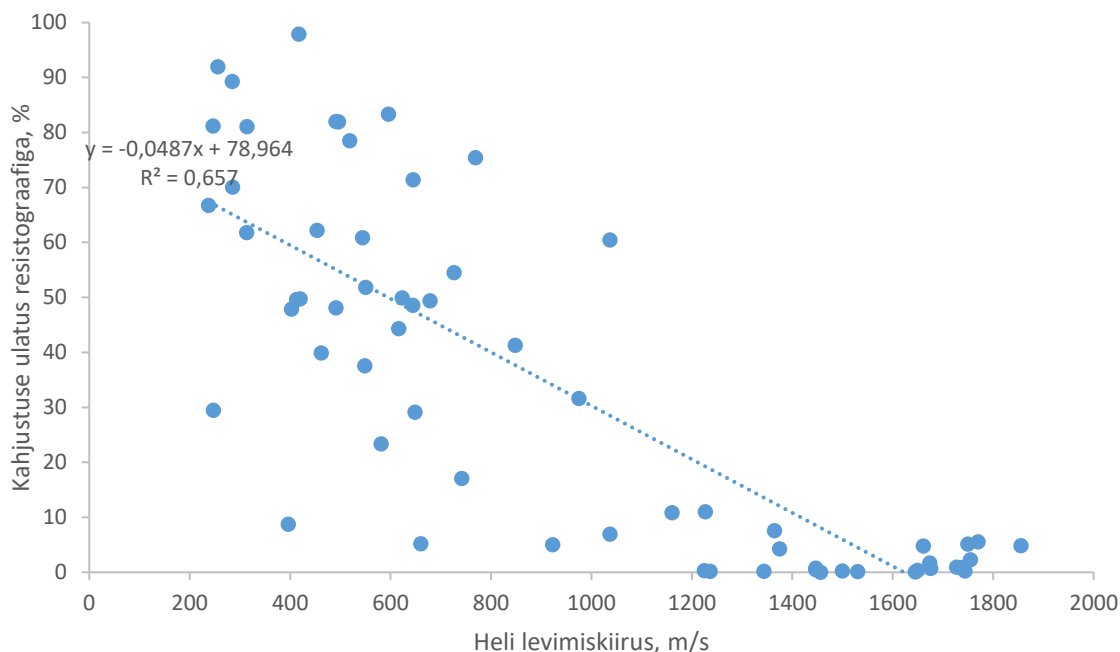
### 3.4.2. Mänd

Alljärgnevalt analüüsitakse kõigepealt mõõtmise suundasid eraldi ning seejärel üheskoos, viimasest olukorrast saadakse lõplik prognoosvõrrand. Võrdluses on *Fakopp* 'iga abil saadud helilevimise kiirused ja resistograafi vastupanu väärtused. Kusjuures resistograafi vastupanu väärtused on kõikide kuusest katsekehade 90% keskmisest allapoole jäävate väärtuste osakaal.

Radiaalsuunas on vaatluste arv 16, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,81$  (vt lisa 9) ehk kehtib tugev seos. Tangentsiaalsuunas on vaatluste arv 47, korrelatsioonikordaja on  $r=-0,81$  (vt lisa 10) ehk kehtib tugev seos.

Hajuvusdiagrammil (vt joonis 32) kujutatud mudel kirjeldab ära 65,7% (determinatsioonikordaja  $R^2=0,657$ ) helikiiruste tegelikust varieeruvusest. Kahjustuse ulatuse prognoosimiseks helikiiruse abil on sobilik regressioonvõrrand:

$y=-0,0487x+78,964$ . Antud mudel põhineb 16-l radiaalsel ja 47-l tangentsiaalsel mõõtmistulemusel. Mõlema suuna tulemuste korrelatsioonikordaja on  $r=-0,81$  (vt lisa 11) mis vastab tugevale seosele. Lõplik regressioonvõrrand arvestab mõlema suuna vaatlusi koos praktilisest aspektist.



**Joonis 32.** Männist katsekehades (tangentsiaal- ja radiaalsuund) heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm

### 3.5. Kolme meetodi omavaheline sõltuvus

#### 3.5.1. Kuusk

Tootjapoolne heli levimiskiirus kahjustamata kuusepuidus ristikiudu on 1310 m/s (vt tabel 3). Tabelis 13 on toodud kokkuvõttev tabel hindamaks kahjustuse ulatust kuusepuidus. Esimesed kolm tulpu lähtuvad *Fakopp*'i juhendist (vt tabel 4), kuidas määrata esialgne kahjustuse ulatus. Kahjustus sõltub helikiiruse vähenemisest, seega on toodud esimeses veerus kiiruste väärtused vastavalt teise tulba helikiiruse vähenemise protsendile. Kolmas tulp näitab, kuidas *Fakopp*'i juhendi järgi kahjustunud osa suurus sõltub helikiirusest. Neljas veerg näitab konkreetsele helikiiruse vähenemisele vastavat hinnangulist visuaalse kahjustuse protsenti. Kusjuures kahjustunud osa visuaalse vaatluse teel on siin funktsioon  $y = -0,0429x + 67,828$ , kus muutujaks on helikiirus (vt peatükk 3.3.1). Viimane veerg näitab konkreetsele helikiiruse vähenemisele resistograafi 90% keskmisest allapoole jäävate väärtuste osakaalu ristlõikes. Funktsiooniks on eelnimetatus  $y = -0,0377x + 62,696$ , kus muutujaks helikiirus (vt peatükk 3.4.1).

**Tabel 13.** Koondtabel kuusepuidu kahjustuse määramiseks erinevate meetoditega

Kiirus (m/s)	Helikiiruse vähenemine	Kahjustunud osa suurus	Kahjustunud osa visuaalse vaatluse teel (%)	Resistograafi 90% keskmisest suhtelisest vastupanust allpool olevad väärtused (%)
Algne kiirus 1310	Fakoppi juhendi järgi (%)	Fakopp juhendi järgi (%)		
1244,5	5	0	14	16
1179	10	15-25	17	18
1048	20	20-40	23	23
917	30	30-50	28	28
786	40	40-50	34	33
655	50	>50	40	38

Nagu tabelist 13 nähtub on kahe viimase meetodi vaheline seos väga tugev. Kuna visuaalset vaatlust kahjustuse ulatuse hindamisel vastavates lõigetes võib lugeda ka tegelikult kahjustuseks, siis võib pidada ka väga tõepäraseks autori poolt väljapakutud resistograafi tõlgendamise viisi, toetudes väga kõrgele seosele  $r=0,93$  (vt peatükk 3.2.1).



Väikese kahjustuse 5% puhul on viimane väga ebatäpne, hinnates kahjustuse ulatuseks 0%, kuid tegelikkuses võib kahjustuse ulatus olla juba 14% toetudes visuaalsele vaatlusele ning 16% resistograafi töödeldud näidule. 10%-se helikiiruse langule vastab 15-25% kahjustuse ulatus, samasse vahemikku jääb ka visuaalne vaatlus 17% ja resistograafi näit 18%. 20%-sele kahjustusele vastab 20-40% kahjustuse ulatus, samasse vahemikku jääb ka visuaalne vaatlus ja resistograafi näit mõlemad hindavad osakaaluks 23%. 30%-se helikiiruse langule vastab 30-50% kahjustuse ulatus, teised meetodid hindavad mõlemad kahjustuse 28% juurde. 40%-se helikiiruse langule vastab 40-50% kahjustuse ulatus, visuaalne vaatlus ja resistograafi näit mõlemad hindavad väärtusteks vastavalt 34% ja 33%. 50%-se helikiiruse langule vastab juhendi järgi suurem kui 50% kahjustuse ulatus, visuaalse vaatluse järgi on viimane näitaja 40% ja resistograafi järgi 38%.

Fakoppi juhendiga määratud kahjustuse ulatuse sõltuvus helikiiruse langusest kehtib hästi vaid keskmise kahjustuse (10-30%) korral. Väikese kiiruse langu (0-5%) suhtes juhend kahjustust ei määratle aga visuaalsele vaatlusele toetudes võib see juba läheneda 14%-le. Juhend hindab helikiiruse langu (10-50%) vastavat kahjustuse ulatust tegelikust suuremaks.

### **3.5.2. Mänd**

Tootjapoolne heli levimiskiirus kahjustamata männipuidu ristikiudu on 1470 m/s (vt tabel 3). Tabelis 14 on toodud kokkuvõttev tabel hindamaks kahjustuse ulatust männipuidus. Antud tabel on analoogne eelnevale (vt tabel 13). Kusjuures kahjustunud osa visuaalse vaatluse teel on siin funktsioon  $y = -0,0483x + 77,395$ , kus muutujaks on helikiirus (vt peatükk 3.3.2). Viimane veerg näitab konkreetsele helikiiruse vähenemisele resistograafi 90% keskmisest allapoole jäävate väärtuste osakaalu ristlõikes. Funktsiooniks on eelnimetatus  $y = -0,0487x + 78,964$ , kus muutujaks helikiirus (vt peatükk 3.4.2).

**Tabel 14.** Koondtabel männipuidu kahjustuse määramiseks erinevate meetoditega

Kiirus (m/s)	Helikiiruse vähenemine	Kahjustunud osa suurus	Kahjustunud osa visuaalse vaatluse teel (%)	Resistograafi keskmisest suhtelisest vastupanust allpool olevad väärtused (%)
Algne kiirus 1470	Fakoppi juhendi järgi (%)	Fakopp juhendi järgi (%)		90%
1396,5	5	0	10	11
1323	10	15-25	13	15
1176	20	20-40	21	22
1029	30	30-50	28	29
882	40	40-50	35	36
735	50	>50	42	43

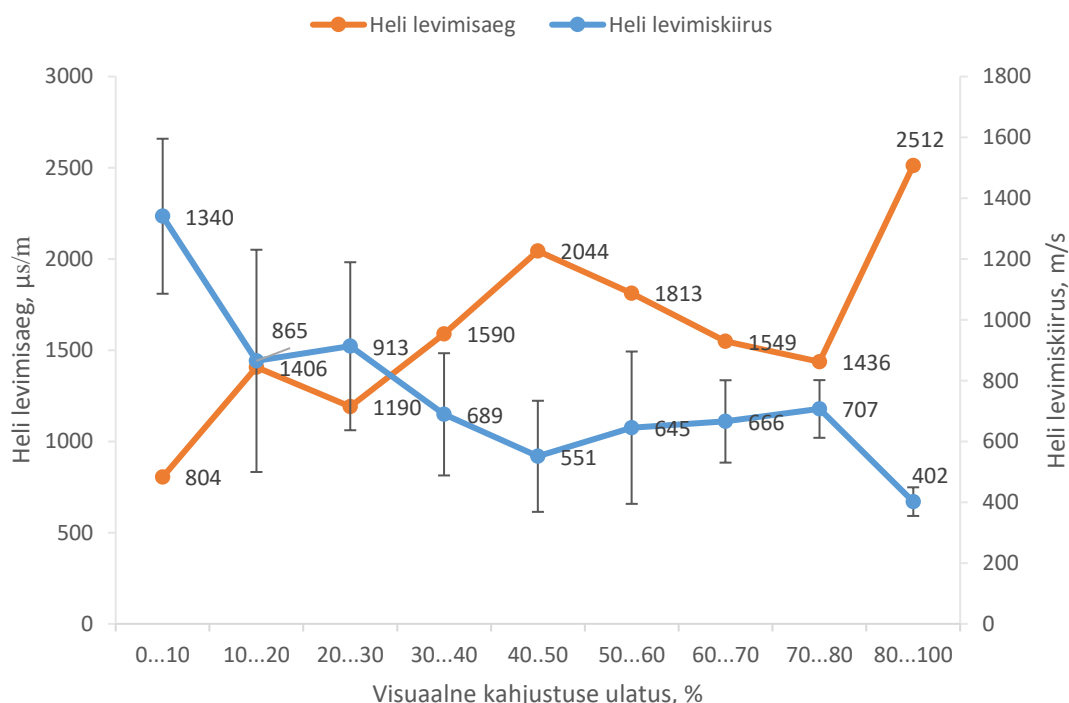
Nagu tabelist 14 nähtub on kahe viimase meetodi vaheline seos väga tugev. Kuna visuaalset vaatlust kahjustuse ulatuse hindamisel vastavates lõigetes võib lugeda ka tegelikult kahjustuseks, siis võib pidada ka väga tõepäraseks autori poolt väljapakutud resistograafi tõlgendamise viisi, toetudes väga kõrgele seosele  $r=0,97$  (vt peatükk 3.2.2).

Väikese kahjustuse 5% puhul on viimane väga ebatäpne, hinnates kahjustuse ulatuseks 0%, kuid tegelikkuses võib kahjustuse ulatus olla juba 10% toetudes visuaalsele vaatlusele ning 11% resistograafi töödeldud näidule. 10%-sele helikiiruse langule vastab 15-25% kahjustuse ulatus, samasse vahemikku jääb ka visuaalne vaatlus 13% ja resistograafi näit 15%. 20%-sele kahjustusele vastab 20-40% kahjustuse ulatus, samasse vahemikku jääb ka visuaalne vaatluse ja resistograafi näidu põhjal vastavalt 21% ja 22%. 30%-sele helikiiruse langule vastab 30-50% kahjustuse ulatus, teised meetodid hindavad seda vastavalt 28% ja 29% juurde. 40%-sele helikiiruse langule vastab 40-50% kahjustuse ulatus, visuaalne vaatlus ja resistograafi näit mõlemad hindavad väärtusteks vastavalt 35% ja 36%. 50%-sele helikiiruse langule vastab juhendi järgi suurem kui 50% kahjustuse ulatus, visuaalse vaatluse järgi on viimane näitaja 42% ja resistograafi järgi 43%.

Fakoppi juhendiga määratud kahjustuse ulatuse sõltuvus helikiiruse langusest kehtib hästi vaid keskmise kahjustuse (10-30%) korral. Väikese kiiruse langu (0-5%) suhtes juhend kahjustust ei määratle aga visuaalsele vaatlusele toetudes võib see juba läheneda 10%-le. Juhend hindab helikiiruse langul (10-50%) vastavat kahjustuse ulatust tegelikust suuremaks. Nii männi- kui kuusepuidu korral seostusid meetodit omavahel väga sarnaselt.

### 3.6. Helikiiruse põhjal kahjustuse ulatuse hindamine

Joonisel 33 on toodud kaks graafikut, sinine näitab heli levimiskiiruse koos standardhälbega ning teine graafik näitab heli levimisaega erinevate kahjustustasemete juures. Heli levimiskiiruse abil saab puidu kahjustuse teada hinnanguliselt. Üldistavalt võib jaotada tulemused kolme gruppi. Esiteks terve või kergelt kahjustunud puit (0...10%), kus helikiiruse keskmine oli 1340 m/s. Teiseks keskmiselt kahjustunud puit (10...30%), kus helikiiruste keskmised väärtused olid 865 m/s ja 913 m/s. Kolmandaks võib tuua tugevasti kahjustunud puidu (30...80%), kus helikiirused kõiguvad 551- 707 m/s vahel. Siinjuures tuleb märkida, et selles vahemikus ei ole võimalik kindlaks teha, kas on tegemist 30% või juba 80% kahjustusega, kuna kiiruste erinevus on väike ning standardhälve ületab nende muut. Täiesti kahjustunud puit (80...100%) eristus ka viimastest, kus heli levimiskiirus oli keskmiselt 402 m/s, standardhälve oli viimasel ka väga madal. Kusjuures tuleb tähele panna, et vaatluste arv kõikus ka grupiti, olles arvukaim grupis 0...10%- 31 tulemust ning grupis 80...100% vaid 3 tulemust (vt tabel 15).

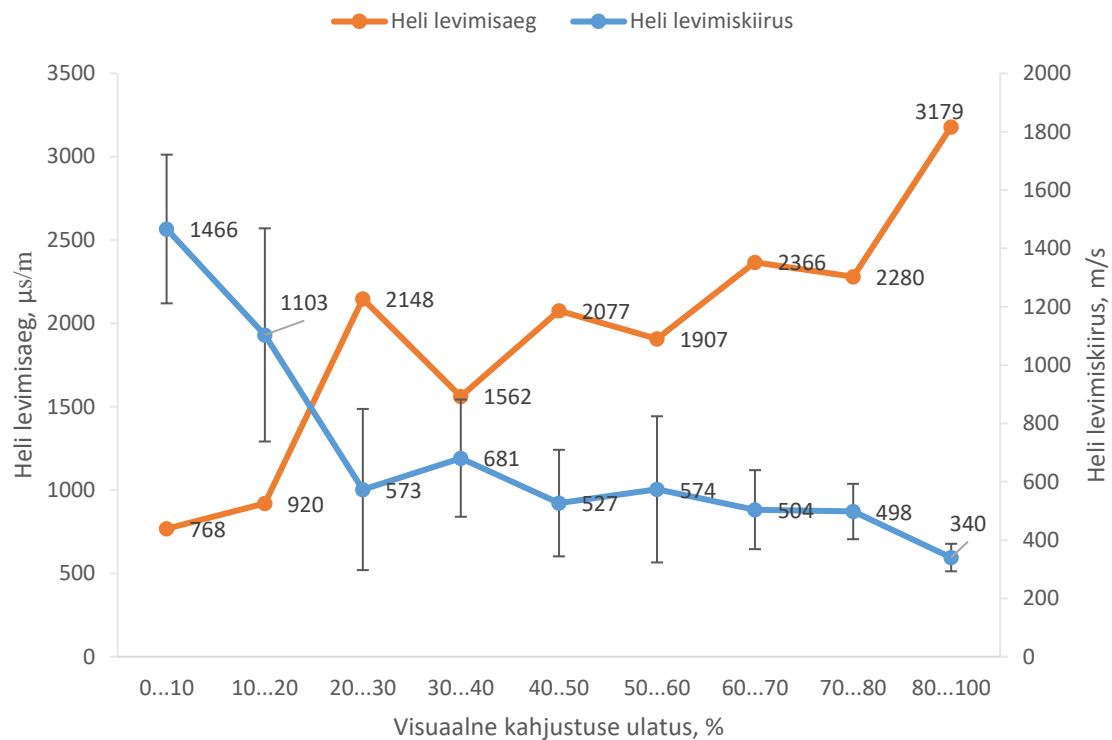


**Joonis 33.** Heli levimiskiiruse ja -aja väärtused vastavalt kahjustuse ulatusele kuusepuidus

**Tabel 15.** Heli levimiskiiruse ja –aja statistikud vastavates kahjustusastmete gruppides kuusepuidus

Visuaalne kahjustuse ulatus, %	0...10	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70	70...80	80...100
Heli levimisaeg, $\mu$ s/m	804	1406	1190	1590	2044	1813	1549	1436	2512
Heli levimisaja standardhälve, $\mu$ s/m	235	745	361	529	831	842	309	88	315
Heli levimiskiirus, m/s	1340	865	913	689	551	645	666	707	402
Heli levimiskiiruse standardhälve, m/s	255	365	276	201	183	251	135	95	47
Mõõtmiste arv grupis, tk	31	11	14	18	7	6	4	4	3

Joonis 34 on analoogne eelnevaga. Heli levimiskiiruse abil saab puidu kahjustuse teada hinnanguliselt. Üldistavalt võib jaotada tulemused kolme gruppi. Esiteks terve või kergelt kahjustunud puit (0...10%), kus helikiiruse keskmine oli 1466 m/s. Teiseks keskmiselt kahjustunud puit (10...20%), kus helikiiruse keskmine väärtus oli 1103 m/s. Kolmandaks võib tuua tugevasti kahjustunud puidu (20...80%), kus helikiirused kõiguvad 498- 681 m/s vahel. Siinjuures tuleb märkida, et selles vahemikus ei ole võimalik kindlaks teha, kas on tegemist 20% või juba 80% kahjustusega, kuna kiiruste erinevus on väike ning standardhälve ületab nende muutu. Täiesti kahjustunud puit (80...100%) eristus ka viimastest, kus heli levimiskiirus oli keskmiselt 340 m/s, standardhälve oli viimasel ka väga madal. Kusjuures tuleb tähele panna, et vaatluste arv kõikus ka grupiti, olles arvukaim grupis 0...10%- 25 tulemust ning grupis 80...100% vaid 5 tulemust (vt tabel 16).



**Joonis 34.** Heli levimiskiiruse ja –aja väärtused vastavalt kahjustuse ulatusele männipuidus

**Tabel 16.** Heli levimiskiiruse ja –aja statistikud vastavates kahjustusastmete gruppides männipuidus

Visuaalne kahjustuse ulatus, %	0...10	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70	70...80	80...100
Heli levimisaeg, $\mu\text{s/m}$	768	920	2148	1562	2077	1907	2366	2280	3179
Heli levimisaja standardhälve, $\mu\text{s/m}$	416	143	1294	425	783	528	1266	900	920
Heli levimiskiirus, m/s	1466	1103	573	681	527	574	504	498	340
Heli levimiskiiruse standardhälve, m/s	350	160	251	193	163	219	217	198	47
Mõõtmiste arv grupis, tk	25	3	4	5	4	7	4	6	5

Kahjustuse üldhinnagu määramiseks on koostatud tabelid 17 ja 18, mille arvutamisel on lähtutud eelnevatest graafikutest (vt joonis 32 ja 33). Gruppide vahelised piirid on arvutatud kohtadesse, kus toimuvad suuremad üleminekud heli levimiskiirustes.

**Tabel 17.** Heli levimiskiiruse ja –aja väärtused vastavalt kahjustuse hinnangule kuusepuidus

Kahjustuse hinnang	Kahjustuse osakaal %	Heli levimiskiirus (m/s)	Heli levimisaeg (µs/m)
Terve/ kergelt kahjustunud	0-10	>1127	<887
Keskmiselt kahjustunud	10-30	1127-786	887-1272
Tugevalt kahjustunud	30-80	786-477	1272-2096
Täielikult kahjustunud	80-100	<477	>2096

**Tabel 18.** Heli levimiskiiruse ja –aja väärtused vastavalt kahjustuse hinnangule männipuidus

Kahjustuse hinnang	Kahjustuse osakaal %	Heli levimiskiirus (m/s)	Heli levimisaeg (µs/m)
Terve/ kergelt kahjustunud	0-10	>1285	<778
Keskmiselt kahjustunud	10-20	1285-892	778-1121
Tugevalt kahjustunud	20-80	892-419	1121-2387
Täielikult kahjustunud	80-100	<419	>2387

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida heli levimise aja, resistograafi vastupanu ja visuaalse kahjustuse omavahelist seost erinevate kahjustuse ulatuste juures. Sooviti leida prognoosvõrrandid, mis iseloomustaksid viimase kolme meetodi omavahelist sõltuvust erinevate kahjustustasemetega juures. Kahjustusega katsekehad saadi okaspuust kandetarinditest, uuringus kasutatavad puuliigid olid mänd (*Pinus sylvestris*) ja kuusk (*Picea abies*). Männist katsekehade (ristlõigete) arv oli 17 ning kuuse puhul oli vaatluse all 25 ristlõiget. Kokku vastavalt 47 (millest 16 radiaalset ja 31 tangentsiaalset) ja 95 (millest 20 radiaalset ja 70 tangentsiaalset) mõõtmisruudu, ühele lõikele märgiti neid peale 1 kuni 6 tükki.

Kõigepealt mõõdeti katsekehade ristlõiked, siis teostatati helilaine levimise aja mõõtmine ristikiudu radiaal- ja tangentsiaalsuunas *Fakopp Microsecond Timer*'iga. Mõõtmistulemused kanti *Microsoft Excel* tabelisse, kus leiti vastavalt teepikkuse ja aja jagatisena helilevimise kiirused puidus. Samadest asukohtadest (anduri naagli süviku kõrvalt) teostati seadmega *Resistograph*® 4453-P vastupanu puurimised. Saadi andmed *DPA* faili formaadis, mis kanti samuti *Microsoft Excel* tabelisse. Andmete analüüsimiseks lõigati maha graafiku algus (puuri sisenemine) ja graafiku lõpp (puuri väljumine). Graafiku alusel kahjustuse hindamiseks töötati välja reegel. Kõikide puuliigi siseste mõõtmistulemuste suhtelise vastupanu keskmise 90%-lisest väärtusest allapoole jäävad väärtused loetakse kahjustuseks 0,1 mm täpsusega. Kuusepuidu puhul on suhtelise vastupanu keskmiseks väärtuseks 118,8 ja männil vastavalt 117,4. Just eelnimetatud väärtustest 90% annab väga kõrget seost visuaalse kahjustusega, mida võib ka tinglikult lugeda tegelikuks kahjustuseks. Suhtelise vastupanu väärtus eraldi, selle keskmine väärtus ning 85% ja 95% sellest ei kirjelda kahjustuse ulatust niivõrd hästi.

Pärast eelneva kahe meetodi sooritamist tehti saega mõõtmiskohtadest läbilõiked, et saada nendest reaalne visuaalse vaatluse tulemus. Ristlõikelt mõõdeti ära kahjustuse ulatus joonlauaga ning jagati läbi selle kogu pikkusega, et saada visuaalse kahjustuse osakaal protsentides. Siinkohal tuleb toonitada, et tegemist ei ole klassikalise kaudse visuaalse vaatlusega ning see ise ei kuulu mittepurustava meetodi alla, sest detail lõigati konkreetsetest mõõtmise kohtadest pooleks. Viimane meetod ei ole selle enda seisukohast tähtis, vaid on

oluline kahe eelneva mittepurustava meetodi hindamiseks, võrdlemiseks, täpsuse selgitamiseks ja mudelite koostamiseks.

Tehti kindlaks helikiiruse ja visuaalse kahjustuse vaheline seos, mida kirjeldab kuuse puhul võrrand  $y = -0,0429x + 67,828$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,69$ , mis vastab keskmisele seosele. Männil kirjeldab seost võrrand  $y = -0,0483x + 77,395$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,82$  mis näitab tugevat seost. Kõik töös olevad analüüsid osutusid statistiliselt olulisteks.

Tehti kindlaks resistograafia vastupanu puurimise ja visuaalse kahjustuse vaheline seos, mida kirjeldab kuuse puhul võrrand  $y = -0,9801x + 0,9209$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,93$ , mis vastab väga tugevale seosele. Männil kirjeldab seost võrrand  $y = -0,9498x + 0,4378$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,97$  mis näitab samuti väga tugevat seost.

Tehti kindlaks helikiiruse ja resistograafia vastupanu puurimise vaheline seos kahjustunud puidus, mida kirjeldab kuuse puhul võrrand  $y = -0,0377x + 62,696$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,64$ , mis vastab keskmisele seosele. Männil kirjeldab seost võrrand  $y = -0,0487x + 78,964$ , kus korrelatsioonikordaja  $r = 0,81$ , mis tugevat seost.

Kõikidel puhkudel on täpsemaid seoseid andnud männist katsekehad. Seda võis tingida asjaolu, et kuuse kahjustuste ulatus muutus ühtlasemalt. Männil eristusid pigem terved ja väga kahjustunud piirkonnad, mis tingis ka kõrgemad korrelatsioonid.

Helikiiruse ja resistograafi omavaheline võrdlus näitab, et nende koos kasutamine ei anna suuremat täpsust, kuna resistograafi tulemus seostub tegeliku/visuaalse kahjustusega tugevamalt kui helikiiruse endaga. Seega kui on võimalik kasutada resistograafi siis Fakopp'i lisaks kasutamine pole reeglina otstarbekas.

Kuusepuidu puhul selgus, et kahjustuse hindamine on võimalik järgneval viisil. Terve või kergelt kahjustunud puit (0-10%) helikiirusega  $>1127$  m/s. Keskmiselt kahjustunud puit (10-30%) helikiirusega  $1127 - 786$  m/s ning tugevasti kahjustunud puit (30-80%)  $786 - 477$  m/s, viimasest eristub ka täielikult kahjustunud puit (80-100%)  $<477$  m/s. Tugeva kahjustuse 30-80% korral pole võimalik kahjust täpselt hinnata, see tähendab sarnaseid heli levimiskiirusi võib põhjustada nii 30%-line kahjustus kui ka 80%-line kahjustus olenevalt selle omapäras. Männipuidu puhul analoogselt terve või kergelt kahjustunud puit (0-10%) helikiirusega  $>1285$  m/s. Keskmiselt kahjustunud puit (10-20%) helikiirusega  $1285 - 892$  m/s ning tugevasti kahjustunud puit (20-80%)  $892 - 419$  m/s, viimasest eristub ka täielikult



kahjustunud puit (80-100%) <419 m/s. Üldistavalt võib öelda, et Fakoppi tulemus annabki usaldusväärselt vaid teabe selle kohta kas puit on terve, keskmiselt- või tugevalt kahjustunud.

Töös on käsitletud ka ühe osana pragude mõju helikiirusele, kus selgub kuidas need mõju avaldavad. Mõõtmised tehti kolmelt erinevalt prao sügavuselt. Kusjuures mõra laius oli konstantselt 3 mm. Millest selguski, et mõra mõjutab helikiirust suhteliselt lineaarselt sügavuste vahemikus 65 mm, 37,5 mm, 12,5 mm ning 12,5 mm praost eemal. Männil siis vastavad helikiiruse langused: 48,0%, 38,1%, 17,6% ja 9,5% ning kuusel 37,0%, 32,4%, 11,5% ja 2,9%. Antud tulemustest järeldub, et helikiirust kuusepuidus mõjutavad praod vähem.

Kuigi puidupraod mõjutavad heli levimiskiirust, siis suurema kahjustuse korral on see ikkagi selgelt eristatav. Heli levimiskiiruste juures, mis annavad tugeva kahjustuse hinnangu kuuselpuidul (kahjustuse ulatus > 30%) ning männipuidul (kahjustuse ulatus > 20%), saab kindlalt väita, et helikiiruse langus ei ole tingitud pragudest. Praod võivad tulemustes tekitada halvimal juhul helikiiruse languse, mis kuuse puhul vastab kuni 30% ning männipuidus kuni 20% kahjustuse ulatusele.

Reaalses olukorras jäävad mõrad küll pigem laiusele 37,5 mm kuni 12,5 mm aga needki mõjutavad helikiirust märkismisväärselt. Kuna 65 mm prao olemasoluks peaks reaalses olukorras detaili äärest  $\frac{1}{4}$  kauguselt mõõtes selle kogu laius ulatuma 260 mm eeldades, et puusüdamikku mõra ei läbi. Helikiirusele saab määravaks prao sügavus mitte selle paksus, sest juba 1 mm sügavune pragu ei saa heli otse üle kanda.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Roos, A.** *Puit ja puitmaterjalid*. 49 lk.  
[[http://www.roometi.com/projekt/ruit/ruit\\_ja\\_puitmaterjalid.pdf](http://www.roometi.com/projekt/ruit/ruit_ja_puitmaterjalid.pdf)] (23.04.2017).
2. **Pärnamägi, H.** (2005). *Ehitusmaterjalid*. (Õppematerjal). Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool. 236 lk.
3. Puidu liigid. [[http://castle.pri.ee/?page\\_id=3931](http://castle.pri.ee/?page_id=3931)]. (23.04.2017).
4. **Just, E.; Just A.** (2016). *Puitkonstruktsioonid*. Arhitekti õppes. EEK 0056. Tallinn. 134 lk.  
[[https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:y\\_jPCd2\\_V18J:https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste\\_projekteerimise\\_instituut/Oppematerjalid/puit\\_arhitektid/Arh\\_Puit\\_2016.pdf+&cd=1&hl=et&ct=clnk&gl=ee&client=firefox-b-ab](https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:y_jPCd2_V18J:https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/puit_arhitektid/Arh_Puit_2016.pdf+&cd=1&hl=et&ct=clnk&gl=ee&client=firefox-b-ab)] (23.04.2017).
5. **Pilt, K.** (2013). *Puidu biokahjustused*. (Presentatsioon). Eesti Vabaõhumuuseum. 7 lk.  
[[www.metsaselts.ee/failid/File/.../loeng%20Põllumajandusmuuseum.pdf](http://www.metsaselts.ee/failid/File/.../loeng%20Põllumajandusmuuseum.pdf)] (25.04.2017)
6. **Pilt, K.** (2010). *Mittepurustavad meetodid puitkonstruktsioonide kestvuse uurimiseks kultuuriväärtuslikes hoonetes*. Tartu : Eesti Maaülikool. 3 lk.  
[<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:LTrXc4yhJdIJ:majavamm.ee/wp-content/uploads/2014/11/Mittepurustavad-meetodid-puitkonstruktsioonide-kestvuse-uurimiseks.pdf+&cd=1&hl=et&ct=clnk&gl=ee>] (26.04.2017)
7. **Teder, M.** (2012). Overview of some non-destructive techniques for in situ condition assessment of timber structures. In: *Fungi and Beetles in Historic Timber Structures in Northern Europe. Proceedings of the international workshop*. Petrozavodsk, May 29 - June 1, 2012. Petrozavodsk: Karelian Research Centre of RAS, pp. 59-67.
8. **Niemz, P.** (2009). *Methods of non-destructive wood testing*. Zurich, Institute for Building Materials.
9. **Pellerin, R. F.; Ross, R. J.** 2002. *Nondestructive evaluation of wood*. USA: Forest Products Society. 210 p.
10. **Ross, R. J.; White, R. H.; Pellerin, R. F.; Wang, X.; Brashaw, B. K.** 2004. *Wood and timber condition assessment manual*. USA: Forest Products Society. 73 p
11. **Arriaga, F.; Iniguez, G.; Esteban, M.; Fernandez-Golfin, J. I.** 2006. *Structural Tali timber: Assessment of strength and stiffness properties using visual and ultrasound methods*. Madrid: Springer-Verlag.
12. **Kotlinova, M.; Kloiber, M.; Vasconcelos, G.; Lourenco, P. J. B. B.; Branco, J. M. G.** 2008. *Non-destructive testing of wood*. Portugal.
13. **Kasal A., Anthony R.** (2004) Advances in situ evaluation of timber structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, Vol. 6(2), p. 94-103.

14. **Sandak, Anna; Sandak, Jakub; Riggio, Mariapaola.** (2015) In *Assessment of structural timber members by non- and semi-destructive methods, Construction and Building Materials.* 101 Part 2:1197-1205 Part 2 Language: English. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.063, Database: ScienceDirect.
15. **Vainola, M.** (2011). *Puuseened*. (õpiobjekt), Haapsalu Kutsehariduskeskus. [WWW] [[http://www.hkhk.edu.ee/puuseened/valge\\_ja\\_pruunmdanik.html](http://www.hkhk.edu.ee/puuseened/valge_ja_pruunmdanik.html)] (27.04.2017)
16. **Pellerin, R.F., DeGroot, R.C., Esenther, G.R.** (1985). *Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units*. In: Proceedings, 5th Nondestructive testing of wood; 1985 September 9.11; Pullman, WA. Pullman, WA: Washington State University
17. **Pellerin, R.F. and Ross, R.J.** 2002. Inspection of timber structures using stress wave timing nondestructive evaluation tools. In: Pellerin, R. F., Ross, R. J. ed. *Nondestructive evaluation of wood*. Madison, WI, USA: Forest Products Society, pp. 141-148.
18. **Fakopp user`s guide.** Fakopp Microsecond Timer. Fakopp Enterprise. [[http://www.fakopp.com/docs/products/mstimer/Fakopp\\_MT\\_Guide.pdf](http://www.fakopp.com/docs/products/mstimer/Fakopp_MT_Guide.pdf)] (29.04.2017)
19. **Rinntech.** 2012. Resistograph [<http://www.rinntech.de/content/view/8/34/lang,english/>] (01.05.2017)
20. **Dunster, J. A.** 2000. *A Manual for Users of the Resitograph Decay Detection Instrument*. Brown Island, BC: Dunster & Associates Environmental Consultants Ltd. [[http://www.imlusa.com/Resistograph\\_Manual\\_from\\_Julian.pdf](http://www.imlusa.com/Resistograph_Manual_from_Julian.pdf)] (01.05.2017)
21. FMC/FME Moisture Meter (2004). – Operating Instructions [[https://www.pceinstruments.com/english/slot/2/download/2200695/fmc\\_fme.pdf](https://www.pceinstruments.com/english/slot/2/download/2200695/fmc_fme.pdf)] (02.05.2017)
22. **Kiviste, A.** (2007). *Matemaatiline statistika MS Exceli keskkonnas*. Tartu, 86 lk.
23. **Kaart, T.** (2010). *Kahe arvunnuse ühine käitumine, korrelatsioon-jaregressioonanalüüs*. [[http://www.eau.ee/~ktanel/DK\\_0007/loengud.php](http://www.eau.ee/~ktanel/DK_0007/loengud.php)] (02.05.2017)

## SUMMARY

The aim of this research was to investigate stress wave time, resistograph resistance and visual inspection correlation between each other at different ranges of decay. Whereby was objective to find prediction equations which could characterize forementioned methods relations at different levels of timber deterioration. Samples were taken from harmed conifers structural elements, used species in this study was pine (*Pinus sylvestris*) and spruce (*Picea abies*). Number of pine samples (cross-sections) were 17 and in case of spruce, 25 sections were under inspection. Together with all measuring directions accordingly 47 (amongst 16 radials and 31 tangentials) and 95 (amongst 20 radials and 75 tangentials), at one cross-section were 1 to 6 measuring directions.

At first was measured dimensions of samples, then was carried out stress wave transmission time measuring perpendicularly to grain in radial- and tangential directions with Fakopp Microsecond Timer. Results were transfered to *Microsoft Excel* worksheet, where was found stress wave speed by dividing detail distance with stress wave transmission time. At exactly same places (next to transmitter indentatio piercer) was performed by device Resistograph ® 4453-P using resistance drilling. Results obtained at DPA file format, which were also transfered to worksheet. To make graphs relevant there was nessecary to cut down beginnings (drill entry) and ends (drill exit) of graphs. To assess decay according graphs was rule worked out.

Inside pine and spruce all results were obtained relative resistance average. 90% of that value was hereafter used and below that result was counted as decay precise of 0,1 mm. In case of spruce, relative resistance average value was 118,8 and pine accordingly 117,4. Specifically 90% of forementioned values gives very high relation between visual decay, which can be conditionally count on actual decay. Relative resistance value separately, 85% and 95% of its average doesn't describe range of deterioration so well.

After performing previous two methods was cut made with power saw at earlier measuring points, in aim to get actual picture and visual inspection results. At these cross-sections was decay measured with ruler and afterthat the result was divided by sample full diameter to get visual decay range by percentage of undamaged section. At this point must be accentuate, in

this case are not ordinary visual inspection and itself is here is not belonging under non-destructive method because detail was cut to half at visual examination place. Latter method is not important at point of itself but more for getting comparison, assess and specify results also redact new models for two forementioned non-destructive metods.

Correlation between stress wave speed and visual decay inspection was determined, which was described for spruce by equation  $y = -0,0429x + 67,828$ , where correlation coefficient  $r = 0,69$ , which refers to moderate relation. Equation for pine is following  $y = -0,0483x + 77,395$ , where correlation coefficient  $r = 0,82$ , which refers to strong relation. In this study turn out to be all analyses statistically significant.

Correlation between resistograph resistance drilling and visual decay inspection was determined, which was described for spruce by equation  $y = -0,9801x + 0,9209$ , where correlation coefficient  $r = 0,93$ , which refers to a very strong relation. Equation for pine is following  $y = -0,9498x + 0,4378$ , where correlation coefficient  $r = 0,97$ , which refers also to a very strong relation.

Correlation between resistograph resistance drilling and stress wave speed was determined, which was described for spruce by equation  $y = -0,0377x + 62,696$ , where correlation coefficient  $r = 0,64$ , which refers to strong relation. Equation for pine is following  $y = -0,0487x + 78,964$ , where correlation coefficient  $r = 0,81$ , which refers also to strong relation.

Better correlation was obtained in all cases by pine specimens. It may be caused, because spruce had more samples in every decay group. On the other hand pine was contrasted in two sides, at healthy and severely deteriorated samples, which induced higher correlations.

Stress wave speed and resistograph comparison in between shows these methods using together are not giving more precision, because resistograph result relates higher with actual/visual decay than stress wave speed itself. Thus if it is possible to use resistograph then to use Fakopp additionally is not reasonable anymore.

In case of spruce wood revealed that assessment of decay are possible in following way. Healthy or slightly decayed timber (0-10%) with sound speed  $>1127$  m/s. Moderate decayed timber (10-30%) with sound speed  $1127 - 786$  m/s and severely decayed timber (30-80%)  $786-477$  m/s, forementioned can be separated as totally decayed timber (80-100%)  $<477$

m/s. Whereby in case of strong decay (30-80%), can't be possible to evaluate exact range of deterioration. It means similar stress wave speed results can be obtained from 30% as well as 80% decay range. Pine wood analogically healthy or slightly decayed timber (0-10%) with sound speed >1285 m/s. Moderate decayed timber (10-20%) with sound speed 1285 – 892 m/s and severely decayed timber (20-80%) 892-419 m/s, forementioned can be separated as totally decayed timber (80-100%) <419 m/s. Generally can say that *Fakopp* result gives reliable information only about if timber is healthy, moderate- or severely decayed.

In this study was handled also in one part timber cracks influence to stress wave speed, where turns out how these impacting speed. Measurement was done at three different depths of crack. Whereby crack width was constantly 3 mm. That revealed, fracture influences stress wave speed quite linearly at range of depths 65 mm, 37, 5 mm, 12 mm and 12,5 mm away from a crack. Pine stress wave speed decrease accordingly 48,0%, 38,1%, 17,6% and 9,5% and spruce 37,0%, 32,4%, 11,5% and 2,9%. It follows that stress wave speed in spruce is affected less about of fractures.

Although stress wave speed are influenced by the cracks in timber, it is still clearly define difference between greater deterioration. At the stress wave speeds, which gives strong decay assessment in case of spruce (decay range > 30%) and pine (decay range >20%), can be surely insist that decrease of sound speed are not conditioned by the cracks. Fractures can generate in the worst case decrease of sound speed, which accords in case of spruce maximally 30% and in pine maximally 20% of decay range.

In real situation cracks depths are rather between 37,5 mm until 12,5 mm but even these can be affect sound speed significantly. While crack width 65 mm existence should be at real situation detail whole diameter at least 260 mm, assume that crack can't pass core and measuring is done  $\frac{1}{4}$  far from the edge. Stress wave speed is influenced more on a crack depth not a width, because already 1 mm width fracture cant transfer sound directly anymore.

**LISAD**



**Lisa 1.** Saematerjalist tervete ja tehispraoga katsekehade paksused ja heli levimisajad

	Prao sügavus	A	B	C	D
	Paksus	105	104	103	103
<b>M1</b>	Helilevimise aeg	132	114	82	81
	Helilevimise aeg	142	121	87	80
	Helilevimise aeg	128	115	86	75
<b>M2</b>	Paksus	104	103	102	101
	Helilevimise aeg	124	105	78	74
	Helilevimise aeg	130	115	76	70
	Helilevimise aeg	121	105	79	69
<b>M3</b>	Paksus	105	104	103	102
	Helilevimise aeg	135	106	85	76
	Helilevimise aeg	139	112	86	76
	Helilevimise aeg	140	100	79	74
<b>M4</b>	Paksus	104	103	102	101
	Helilevimise aeg	136	114	80	74
	Helilevimise aeg	147	112	79	74
	Helilevimise aeg	136	106	86	76
<b>M5</b>	Paksus	104	103	103	103
	Helilevimise aeg	136	117	86	76
	Helilevimise aeg	129	117	87	78
	Helilevimise aeg	127	106	84	70
<b>K1</b>	Paksus	101	101	100	100
	Helilevimise aeg	118	116	96	73
	Helilevimise aeg	123	115	84	74
	Helilevimise aeg	115	116	84	73
<b>K2</b>	Paksus	99	99	99	99
	Helilevimise aeg	123	108	82	75
	Helilevimise aeg	110	105	84	75
	Helilevimise aeg	122	105	80	76
<b>K3</b>	Paksus	100	99	98	98
	Helilevimise aeg	115	103	80	76
	Helilevimise aeg	116	103	76	76
	Helilevimise aeg	112	105	76	76

<b>K4</b>	<b>Paksus</b>	101	100	100	101
	<b>Helilevimise aeg</b>	112	105	86	74
	<b>Helilevimise aeg</b>	117	108	81	74
	<b>Helilevimise aeg</b>	112	104	84	75
<b>K5</b>	<b>Paksus</b>	102	102	102	102
	<b>Helilevimise aeg</b>	114	111	84	81
	<b>Helilevimise aeg</b>	124	110	84	80
	<b>Helilevimise aeg</b>	126	120	82	76
		E			
<b>KT1</b>	<b>Paksus</b>	102	102	102	102
	<b>Helilevimise aeg</b>	81	70	73	86
	<b>Helilevimise aeg</b>	82	70	69	85
	<b>Helilevimise aeg</b>	78	76	70	81
<b>KT2</b>	<b>Paksus</b>	101	101	101	101
	<b>Helilevimise aeg</b>	68	69	78	74
	<b>Helilevimise aeg</b>	60	68	75	75
	<b>Helilevimise aeg</b>	61	70	70	73
<b>MT1</b>	<b>Paksus</b>	103	103	103	103
	<b>Helilevimise aeg</b>	73	60	57	64
	<b>Helilevimise aeg</b>	72	63	57	68
	<b>Helilevimise aeg</b>	69	60	60	63
<b>MT2</b>	<b>Paksus</b>	97	97	97	97
	<b>Helilevimise aeg</b>	66	55	60	62
	<b>Helilevimise aeg</b>	66	56	58	69
	<b>Helilevimise aeg</b>	60	57	54	66

Märkused: M1 kuni M5 tehispraoga männist katsekehad: A - 62,5 mm praokõrgus (heliliikumise teekonnal), B – 37,5 mm praokõrgus, C - 12,5 mm praokõrgus, D – 12,5 mm prao kõrvalt.

MT1 ja MT2 terved männist katsekehad – E

K1 kuni K5 tehispraoga kuusest katsekehad: A - 62,5 mm praokõrgus (heliliikumise teekonnal), B – 37,5 mm praokõrgus, C - 12,5 mm praokõrgus, D – 12,5 mm prao kõrvalt.

KT1 ja KT2 terved kuusest katsekehad – E

## Lisa 2. Männist tervete ja tehispäraga katsekehade heli levimise kiirused

Mänd	A	B	C	D		E
Heli levimise kiirus	m/s	m/s	m/s	m/s		m/s
<b>M1</b>	796	912	1256	1272	<b>MT1</b>	1411
	739	860	1184	1288		1431
	820	904	1198	1373		1493
<b>M2</b>	839	981	1308	1365		1609
	800	896	1342	1443		1515
	860	981	1291	1464		1635
<b>M3</b>	778	981	1212	1342	<b>MT2</b>	1470
	755	929	1198	1342		1470
	750	1040	1304	1378		1617
<b>M4</b>	765	904	1275	1365		1565
	708	920	1291	1365		1406
	765	972	1186	1329		1470
<b>M5</b>	765	880	1198	1355		
	806	880	1184	1321		
	819	972	1226	1471		

## Lisa 3. Kuusest tervete ja tehispäraga katsekehade heli levimise kiirused

Kuusk	A	B	C	D		E
Heli levimise kiirus	m/s	m/s	m/s	m/s		m/s
<b>K1</b>	855,9	870,7	1042	1370	<b>KT1</b>	1259
	821,1	878,3	1191	1351		1244
	878,3	870,7	1191	1370		1308
<b>K2</b>	804,9	916,7	1207	1320		1186
	900,0	942,9	1179	1320		1200
	811,5	942,9	1238	1303		1259
<b>K3</b>	869,6	961,2	1225	1290	<b>KT2</b>	1485
	862,1	961,2	1290	1290		1683
	892,9	942,9	1303	1290		1656
<b>K4</b>	901,8	952,4	1163	1364		1365
	863,2	925,9	1235	1365		1347
	901,8	961,5	1191	1347		1384
<b>K5</b>	894,7	918,9	1214	1259		
	822,6	927,3	1214	1275		
	809,5	850,0	1244	1342		

**Lisa 4.** Kuusest kahjustusega katsekehade mõõtmiste tulemused

1	2	3	4	5 (%)	6 (%)	7 (%)	8 (m/s)	9 (%)	10 (mm)	11 (mm)	12 (mm)
1.KMK1	1A(rad)	5399	126,2	25	7	10	704	14	25	178	174,5
	1B	5400	124,8	42	19	29	989	31	55	178	179,4
	1D	5401	115,4	60	20	30	696	50	66	133	132
	1E	5402	126,7	25	6	13	874	21	28	132	131,5
	1F	5403	136,4	1	0	0	1290	0	0	129	128,6
	2A(rad)	5405	117,8	48	24	35	503	17	30	178	180,3
	2B	5404	119,6	45	13	19	886	34	60	178	184,3
	2D	5406	110,2	63	33	46	388	36	48	133	132,2
	2E	5407	125,4	22	8	10	449	36	47	132	133
	2F	5408	129,6	9	0	0	1252	0	0	129	127,4
2.KMK1	1A(rad)	5409	117,2	52	16	24	1421	18	32	179	181,4
	1D	5528	131,9	17	9	13	701	9	12	131	125,5
3.KMK1	1A	5411	130,5	15	1	2	1116	7	12	183	184,2
	1D	5412	111,3	58	33	46	736	52	70	134	133
	1E	5413	123,9	29	11	17	821	26	35	133	132,7
	1F	5414	120,5	49	9	20	688	23	30	132	132,7
4.KMK1	1A	5415	123,6	39	16	20	920	38	70	185	184,2
	1D	5524	133,7	24	11	16	782	33	45	136	143,4
	1E	5525	123,4	39	26	30	943	27	35	132	137
	1F(rad)	5419	133,1	7	1	2	1355	0	0	126	125,4
1.KMK4	1A	5420	106,9	76	34	44	771	26	50	195	190
	1D	5421	102,0	89	40	60	763	38	55	145	144,2
	1E	5422	121,7	41	8	18	1076	13	20	155	155,5
	1F	5424	116,8	55	5	12	1566	0	0	155	154,7
2.KMK4	1A	5425	140,7	7	2	4	1262	2	5	207	210,4
	1D	5515	128,5	33	28	22	585	40	58	145	148,3
3.KMK4	1D	5428	116,1	56	32	41	636	40	55	138	141,5
	1E	5429	114,3	61	25	34	1069	29	45	155	155,1
	1F(rad)	5430	132,1	8	1	2	1246	0	0	157	158,2
KMK6	1A	5431	80,14	100	89	95	435	100	162	162	161,9
	1D	5433	95,76	67	62	63	841	62	95	153	153,4
	1E	5434	95,76	79	69	73	686	69	105	153	153,9
	1F	5435	81,67	89	83	85	423	85	130	153	151,8
	2A	5432	107,8	68	50	57	519	63	105	167	166,6
	2E	5437	118,2	46	18	26	674	30	46	151	153,6
	2F	5438	91,31	84	77	80	348	83	125	151	152,1
	3A	5439	114,1	55	38	47	318	52	88	169	169,7
	3D	5440	139,6	1	0	0	1415	0	0	150	150,4
	3F	5442	89,57	86	79	80	781	73	110	150	150,9
1.KMK7	1A	5443	108,4	62	43	49	736	44	65	148	148

	1D	5444	116,2	54	29	35	943	30	45	150	151,3
	1E(rad)	5445	122,5	51	26	36	726	50	75	151	152,7
	1F	5512	124,3	48	14	30	573	46	70	153	157,1
2.KMK7	1A	5447	123,2	36	15	22	865	20	30	148	148,4
	1B	5448	112,7	63	31	41	488	41	60	148	148,3
	1C	5449	123,4	28	10	18	913	21	30	146	147,3
	1D	5450	122,0	42	3	15	1220	10	15	150	149,5
	1E	5451	108,2	60	43	50	817	53	80	152	151,8
	1F	5452	103,9	70	53	57	617	69	105	153	153,5
3.KMK7	1A	5453	111,8	57	44	50	788	37	55	149	149,8
	1B	5454	123,3	36	22	27	353	41	60	146	147,2
	1D	5455	126,2	15	1	4	1325	0	0	151	149,7
	1E(rad)	5456	114,4	56	31	37	1133	29	45	153	152,1
	1F	5457	101,4	76	51	59	774	71	110	154	153,4
4.KMK7	1A	5458	101,3	76	53	59	285	47	68	146	148,5
	1D	5459	129,5	22	0	2	1288	0	0	152	151,8
	1E	5460	115,5	54	22	28	1048	36	55	153	152,2
	1F(rad)	5461	98,39	77	58	66	695	77	120	155	154,9
5.KMK7	1A	5462	95,62	88	58	71	392	54	80	147	144,3
	1D	5463	132,9	11	0	0	1198	0	0	151	151,9
	1E	5464	127,6	31	5	16	1205	7	10	153	151,8
	1F(rad)	5466	110,5	63	42	49	969	55	85	155	154,4
6.KMK7	1D	5467	109,5	77	34	45	794	37	55	150	150,5
	1F	5469	104,9	73	54	60	577	76	120	157	157,8
7.KMK7	1D	5470	114,6	58	15	28	633	30	45	150	149,1
	1E	5471	119,2	48	16	23	1069	19	30	154	153
	1F(rad)	5472	110,0	67	41	50	639	54	85	156	154,9
1.KMK8	1A	5507	122,4	24	22	17	558	19	25	129	123,7
	1D	5474	118,5	39	13	24	1464	16	20	123	119,1
	1E(rad)	5475	129,4	8	1	1	1667	0	0	125	122,9
	1F	5476	127,4	8	3	3	1570	0	0	124	125,1
2.KMK8	1A	5477	131,8	12	1	5	1541	4	5	131	125,1
	1D	5478	126,4	24	0	0	1494	0	0	121	120,1
	1E(rad)	5479	130,5	17	1	3	1618	0	0	123	125,6
3.KMK8	1B(rad)	5482	110,1	57	26	29	1304	26	35	133	130,6
	1D	5483	121,0	33	2	4	1481	0	0	120	120,4
	1E(rad)	5484	123,0	26	7	11	1544	8	10	122	120,8
	1F	5485	117,4	41	15	19	1531	0	0	124	119,4
4.KMK8	1A(rad)	5486	121,8	24	14	17	1523	21	28	131	131,3
	1B	5488	131,5	8	5	6	1471	4	5	128	130,6

	1D	5489	132,0	4	0	1	1395	0	0	120	120,2
	1E(rad)	5490	128,6	8	1	1	1662	0	0	123	126,8
	1F	5492	130,5	4	1	1	1524	0	0	125	126,8
1.KMK9	1A	5493	129,4	31	13	21	769	20	35	176	170,9
	1D(rad)	5494	113,7	55	22	27	662	32	50	157	156,6
	1E	5495	122,4	31	16	20	305	13	20	156	156,6
	1F	5496	142,7	9	4	6	879	10	15	153	154
2.KMK9	1A	5506	131,2	28	17	22	493	25	45	182	189,8
	1D	5498	121,7	39	33	36	728	32	50	158	159
	1E(rad)	5499	119,0	48	28	35	523	35	55	158	158,4
	1F	5500	131,5	21	9	14	780	16	25	156	157,9
3.KMK9	1A(rad)	5502	118,7	37	28	32	354	31	55	175	176,8
	1D	5503	136,7	19	4	6	717	10	15	157	157,4
	1E(rad)	5504	118,1	46	32	39	565	32	50	157	156,2
	1F	5505	109,2	55	35	40	543	40	60	150	153,6

Märkused: Tabeli veerud on tähistatud järgmiselt:

1. detaili kodeering
2. mõõtmise asukoht,
3. resistograafi kood,
4. resistograafi suhteline vastupanu,
5. protsent alla resistograafi keskmise väärtuse,
6. protsent alla resistograafi 85%-sest keskmisest väärtusest,
7. protsent alla resistograafi 90%-sest keskmisest väärtusest,
8. helikiirus,
9. visuaalne kahjustunud osa,
10. visuaalne kahjustus,
11. uuritava külje pikkus,
12. resistograafi graafiku pikkus.

## Lisa 5. Männist kahjustusega katsekehade mõõtmiste tulemused

1	2	3	4	5 (%)	6 (%)	7 (%)	8 (m/s)	9 (%)	10 (mm)	11 (mm)	12 (mm)
1.MMK1	1A(rad)	5227	129,0	20	6	11	1160	12	15	123	122,1
	1D	5228	125,9	26	3	5	923	19	20	108	109,5
	2A(rad)	5229	122,1	34	9	11	1227	17	20	119	115,3
	2D	5230	123,6	30	4	7	1037	9	10	112	111,3
2.MMK1	1A	5206	113,0	61	19	32	975	38	45	117	116,7
	1B(rad)	5534	147,8	1	0	0	1447	0	0	136	135,4
	1C	5211	139,4	9	64	4	1375	4	5	132	131,3
	2A	5212	99,1	86	3	75	769	63	75	120	119,1
	2B(rad)	5213	131,8	10	0	1	1447	0	0	136	135,4
	2C	5214	128,2	25	6	8	1365	4	5	131	131,3
3.MMK1	1A	5198	148,2	1	0	0	1225	0	0	136	135,2

	1D	5204	135,7	11	2	5	660	10	10	101	96,6
	2A	5199	146,7	1	0	0	1236	0	0	136	135,7
	2D	5205	132,2	19	4	9	396	5	5	101	100
4.MMK1	1A	5196	150,3	0	0	0	1343	0	0	133	131,7
1.MMK2	1A	5215	98,1	83	62	67	238	62	85	138	134,4
	1B	5216	97,6	78	55	62	454	54	75	138	134,6
	1C	5217	95,3	85	74	79	519	70	95	136	134,9
	1D	5218	106,8	79	28	49	679	43	90	209	204,7
	1E(rad)	5219	102,1	84	46	61	544	59	120	204	197,9
	2A	5222	92,0	93	73	81	246	87	120	138	134,8
	2B	5223	92,7	91	74	81	314	72	100	138	138,1
	2C	5224	95,2	94	66	82	496	88	120	136	137,1
	2D	5225	98,6	87	61	71	645	72	150	209	203,7
	2E(rad)	5226	109,4	72	27	44	616	54	110	204	202,9
2.MMK2	1A	5231	102,3	84	62	70	285	73	100	137	132,2
	1B	5232	104,1	83	44	60	1037	54	75	140	134,9
	1C	5233	108,4	60	44	50	420	74	100	136	134,7
	1D	5234	107,7	73	41	55	727	71	150	210	226,4
	1E(rad)	5535	94,81	91	77	83	596	77	160	208	204,6
1.MMK3	1A	5237	88,88	95	80	89	285	85	120	141	139,1
	1B	5238	121,0	51	19	29	649	25	40	157	158,4
	1D	5239	115,3	55	13	23	581	33	45	136	134,6
	1E(rad)	5240	112,9	61	32	41	848	21	30	140	136,9
	1F	5241	94,3	89	74	82	491	66	95	143	142,1
2.MMK3	1A	5244	108,3	65	40	50	624	41	65	159	160,8
	1D	5242	119,1	52	10	17	742	33	45	135	136,1
	1E	5243	112,1	60	33	49	644	35	50	143	142,1
3.MMK3	1A	5246	105,5	63	45	52	551	54	88	163	166,3
	1B	5249	92,5	95	85	92	256	89	130	146	146,5
	1D	5250	110,7	55	36	40	462	36	50	139	138,4
	1E(rad)	5251	118,7	35	29	29	247	21	30	140	136,2
	1F	5252	109,5	66	33	50	413	53	75	142	148,7
	2A	5253	108,2	60	41	48	402	51	83	163	164,6
	2B	5254	86,1	100	97	98	417	93	136	146	140
	2D	5255	106,2	57	43	48	491	43	60	139	136,4
	2E(rad)	5256	113,3	46	36	38	549	29	40	140	142,8
	2F	5257	105,4	83	44	62	313	49	70	142	142,5
MMK4	1A	5260	145,6	1	1	1	1675	0	0	191	215,9
	1B(rad)	5259	171,4	6	0	0	1650	0	0	193	205,9
	1D	5262	132,9	6	0	0	1531	0	0	150	163,6
	1E(rad)	5263	126,3	33	1	2	1674	0	0	154	153,6
	1F	5264	148,6	0	0	0	1744	0	0	150	149,5
	2A	5265	123,8	41	0	5	1661	0	0	191	202,6

## Lisa 5. järg

	2B(rad)	5266	126,0	31	0	2	1755	0	0	193	200,5
	2D	5267	130,9	4	0	0	1456	0	0	150	152,7
	2E(rad)	5268	123,5	40	0	5	1750	0	0	154	150,9
	2F	5269	127,2	24	0	1	1727	0	0	152	149
	3A	5270	127,5	21	1	1	1736	0	0	191	203,7
	3B(rad)	5271	120,9	53	0	5	1856	0	0	193	194,1
	3D	5274	132,0	2	1	0	1500	0	0	150	150,4
	3E(rad)	5273	124,1	41	0	6	1770	0	0	154	152,5
	3F	5272	133,4	8	0	0	1645	0	0	153	152,2

Märkused: Tabeli veerud on tähistatud järgmiselt:

1. detaili kodeering
2. mõõtmise asukoht,
3. resistograafi kood,
4. resistograafi suhteline vastupanu,
5. protsent alla resistograafi keskmise väärtuse,
6. protsent alla resistograafi 85%-sest keskmisest väärtusest,
7. protsent alla resistograafi 90%-sest keskmisest väärtusest,
8. helikiirus,
9. visuaalne kahjustunud osa,
10. visuaalne kahjustus,
11. uuritava külje pikkus,
12. resistograafi graafiku pikkus.

## Lisa 6. Kuusest kahjustusega katsekehade radiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	SV	AKR	85AKR	90AKR	HK	VKAH
SV	1					
AKR	-0,94	1				
85AKR	-0,93	0,93	1			
90AKR	-0,92	0,94	0,99	1		
HK	0,49	-0,60	-0,66	-0,69	1	
VKAH	-0,87	0,89	0,96	0,95	-0,63	1

Märkused:

**SV**- resistograafi suhteline vastupanu väärtus,

**AKR**- % alla keskmise resistograafi näidu,

**85AKR**- % alla resistograafi 85% keskmisest väärtusest,

**90AKR**- % alla resistograafi 90% keskmisest väärtusest,

**HK**- helikiirus (m/s),

**VKAH**- visuaalselt kahjustunud osa (%)

Kehtib lisa 6 kuni lisa 11 kohta.



**Lisa 7.** Kuusest kahjustusega katsekehade tangentsiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	<b>SV</b>	<b>AKR</b>	<b>85AKR</b>	<b>90AKR</b>	<b>HK</b>	<b>VKAH</b>
<b>SV</b>	1					
<b>AKR</b>	-0,94	1				
<b>85AKR</b>	-0,93	0,87	1			
<b>90AKR</b>	-0,94	0,93	0,98	1		
<b>HK</b>	0,49	-0,58	-0,62	-0,64	1	
<b>VKAH</b>	-0,84	0,84	0,92	0,93	-0,72	1

**Lisa 8.** Kuusest kahjustusega katsekehade kõikide (radiaalsete kui ka tangentsiaalsete) mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	<b>SV</b>	<b>AKR</b>	<b>85AKR</b>	<b>90AKR</b>	<b>HK</b>	<b>VKAH</b>
<b>SV</b>	1					
<b>AKR</b>	-0,93	1				
<b>85AKR</b>	-0,93	0,88	1			
<b>90AKR</b>	-0,94	0,93	0,98	1		
<b>HK</b>	0,48	-0,58	-0,61	-0,64	1	
<b>VKAH</b>	-0,84	0,85	0,93	0,93	-0,69	1

**Lisa 9.** Männist kahjustusega katsekehade radiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	<b>SV</b>	<b>AKR</b>	<b>85AKR</b>	<b>90AKR</b>	<b>HK</b>	<b>VKAH</b>
<b>SV</b>	1					
<b>AKR</b>	-0,87	1				
<b>85AKR</b>	-0,72	0,79	1			
<b>90AKR</b>	-0,76	0,86	0,98	1		
<b>HK</b>	0,58	-0,53	-0,82	-0,81	1	
<b>VKAH</b>	-0,72	0,83	0,93	0,97	0,80	1

**Lisa 10.** Männist kahjustusega katsekehade tangentsiaalsete mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	<b>SV</b>	<b>AKR</b>	<b>85AKR</b>	<b>90AKR</b>	<b>HK</b>	<b>VKAH</b>
<b>SV</b>	1					
<b>AKR</b>	-0,97	1				
<b>85AKR</b>	-0,83	0,82	1			
<b>90AKR</b>	-0,95	0,96	0,89	1		
<b>HK</b>	0,79	-0,80	-0,72	-0,81	1	
<b>VKAH</b>	-0,93	0,94	0,87	0,97	0,82	1

**Lisa 11.** Männist kahjustusega katsekehade kõikide (radiaalsete kui ka tangentsiaalsete) mõõtmiste omavahelised korrelatsioonid

	<b>SV</b>	<b>AKR</b>	<b>85AKR</b>	<b>90AKR</b>	<b>HK</b>	<b>VKAH</b>
<b>SV</b>	1					
<b>AKR</b>	-0,95	1				
<b>85AKR</b>	-0,81	0,82	1			
<b>90AKR</b>	-0,91	0,94	0,91	1		
<b>HK</b>	0,74	-0,74	-0,75	-0,81	1	
<b>VKAH</b>	-0,89	0,92	0,89	0,97	0,82	1

**Lisa 12.** Kuusest katsekehades radiaal- ja tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu regressioonanalüüs

<b>Regressiooni statistikud</b>	<b>Radiaal</b>	<b>Tangentsiaal</b>	<b>Mõlemad koos</b>
Korrelatsioonikordaja	0,69	0,64	0,64
Determinatsioonikordaja	0,47	0,41	0,41
Korrigeeritud determinatsioonikordaja	0,44	0,41	0,41
Mudeli standardviga	14	18	17
Vaatluste arv	20	75	95
P-väärtus	0,00084	4,86675E-10	2,18824E-12

**Lisa 13.** Kuusest katsekehades radiaal- ja tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu regressioonanalüüs

<b>Regressiooni statistikud</b>	<b>Radiaal</b>	<b>Tangentsiaal</b>	<b>Mõlemad koos</b>
Korrelatsioonikordaja	0,63	0,72	0,69
Determinatsioonikordaja	0,40	0,52	0,48
Korrigeeritud determinatsioonikordaja	0,37	0,51	0,48
Mudeli standardviga	17	17	17
Vaatluste arv	20	75	95
P-väärtus	0,00282	3,27009E-13	5,57842E-15

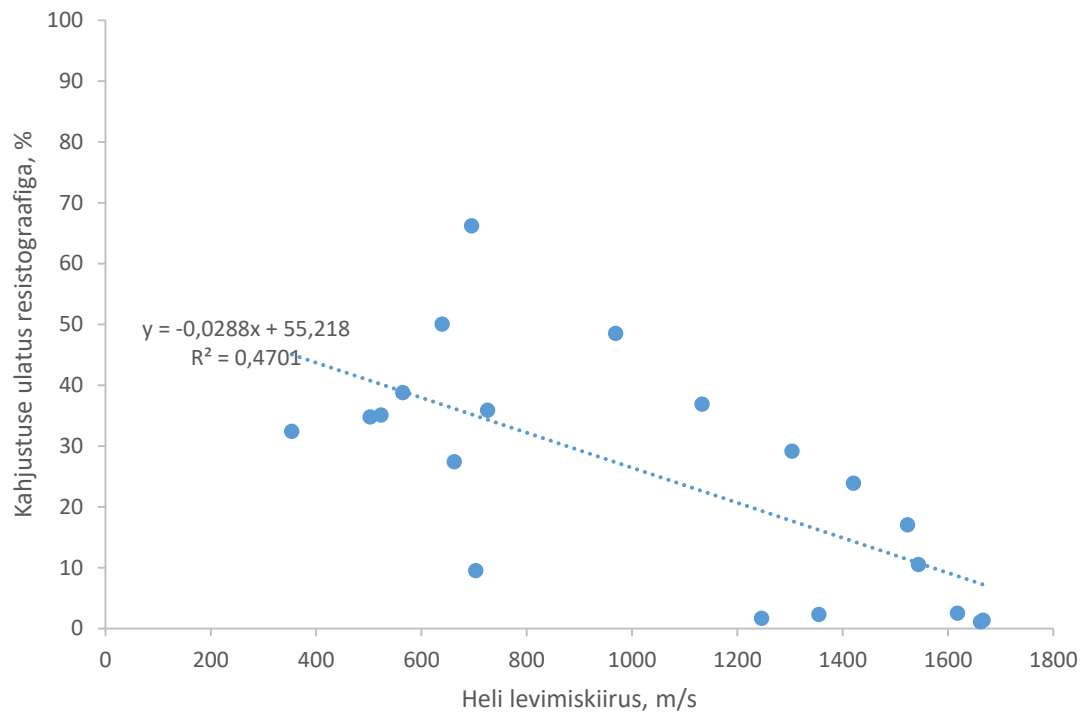
**Lisa 14.** Männist katsekehades radiaal- ja tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu regressioonanalüüs

<b>Regressiooni statistikud</b>	<b>Radiaal</b>	<b>Tangentsiaal</b>	<b>Mõlemad koos</b>
Korrelatsioonikordaja	0,81	0,81	0,81
Determinatsioonikordaja	0,66	0,65	0,66
Korrigeeritud determinatsioonikordaja	0,64	0,64	0,65
Mudeli standardviga	15	20	19
Vaatluste arv	16	47	63
P-väärtus	0,00013	8,89E-12	8,23411E-16

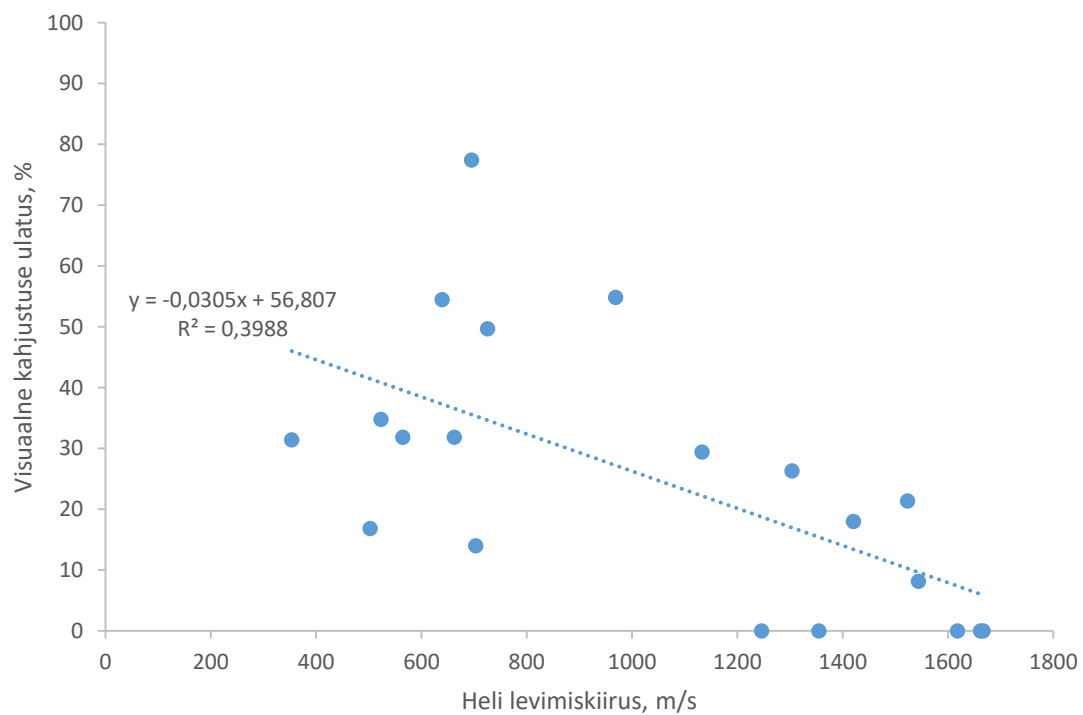
**Lisa 15.** Männist katsekehades radiaal- ja tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu regressioonanalüüs

<b>Regressiooni statistikud</b>	<b>Radiaal</b>	<b>Tangentsiaal</b>	<b>Mõlemad koos</b>
Korrelatsioonikordaja	0,80	0,82	0,82
Determinatsioonikordaja	0,63	0,68	0,68
Korrigeeritud determinatsioonikordaja	0,61	0,67	0,67
Mudeli standardviga	16	18	18
Vaatluste arv	16	47	63
P-väärtus	0,00022	1,46E-12	1,29362E-16

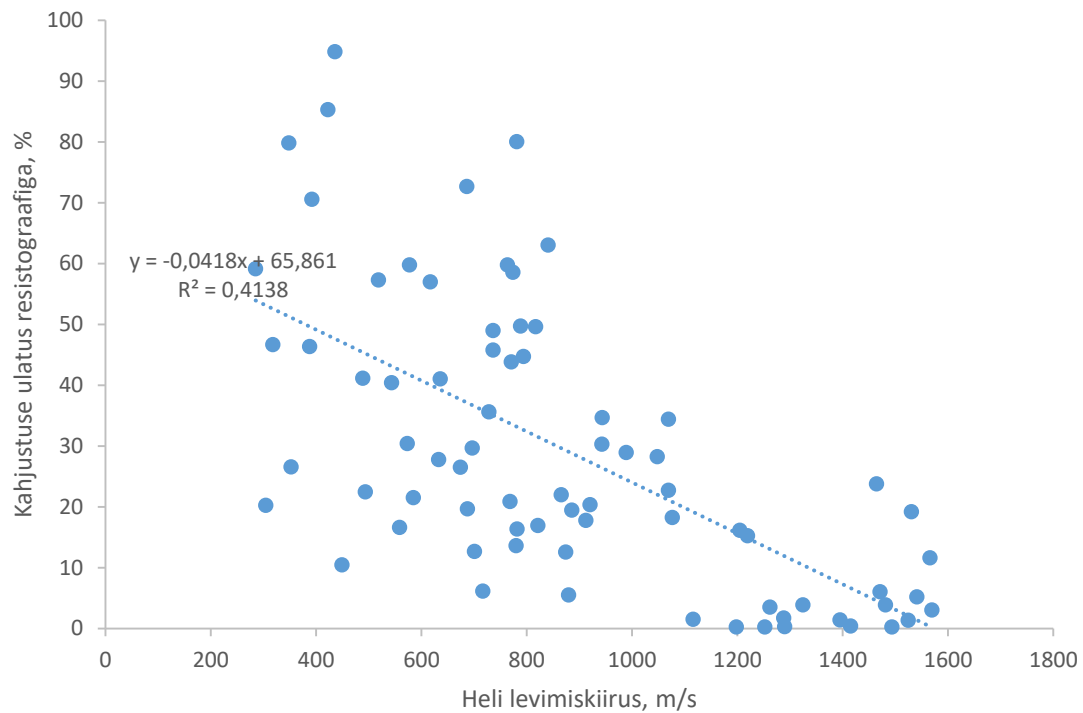
**Lisa 16.** Kuusest katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm



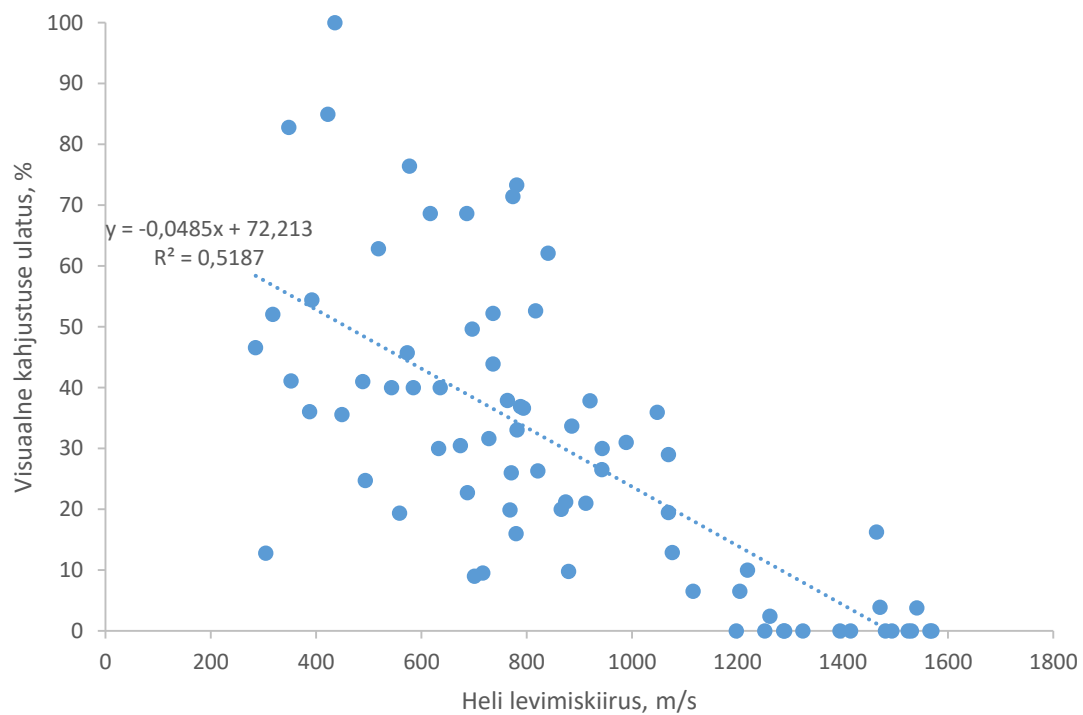
**Lisa 17.** Kuusest katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm



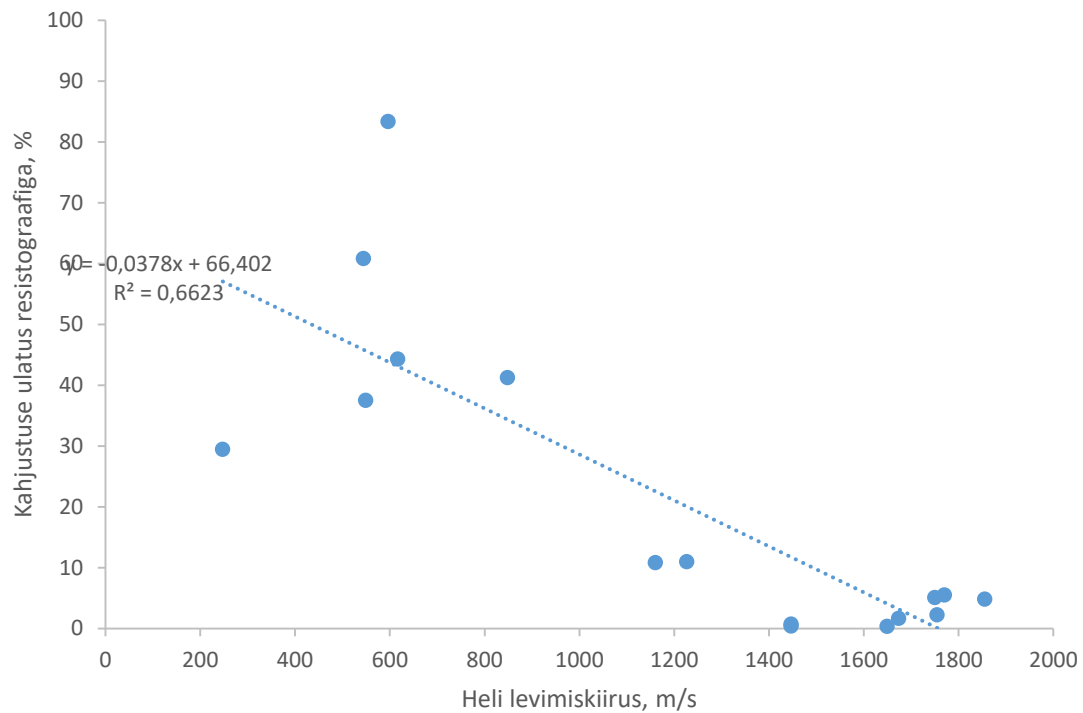
**Lisa 18.** Kuusest katsekehades tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm



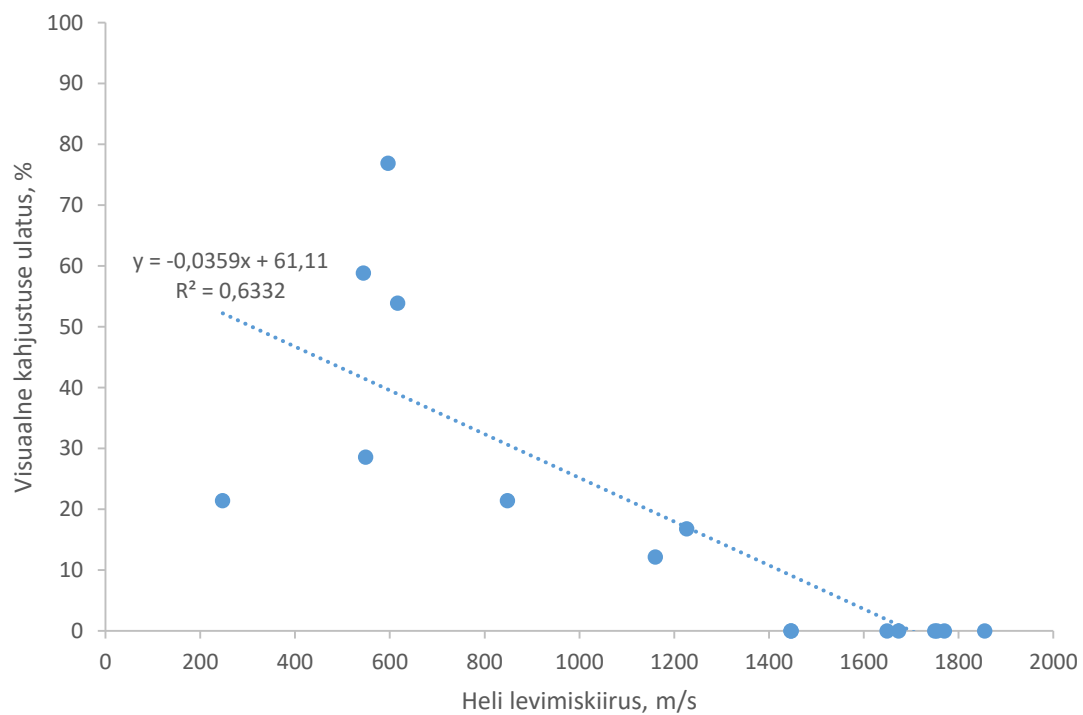
**Lisa 19.** Kuusest katsekehades tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm



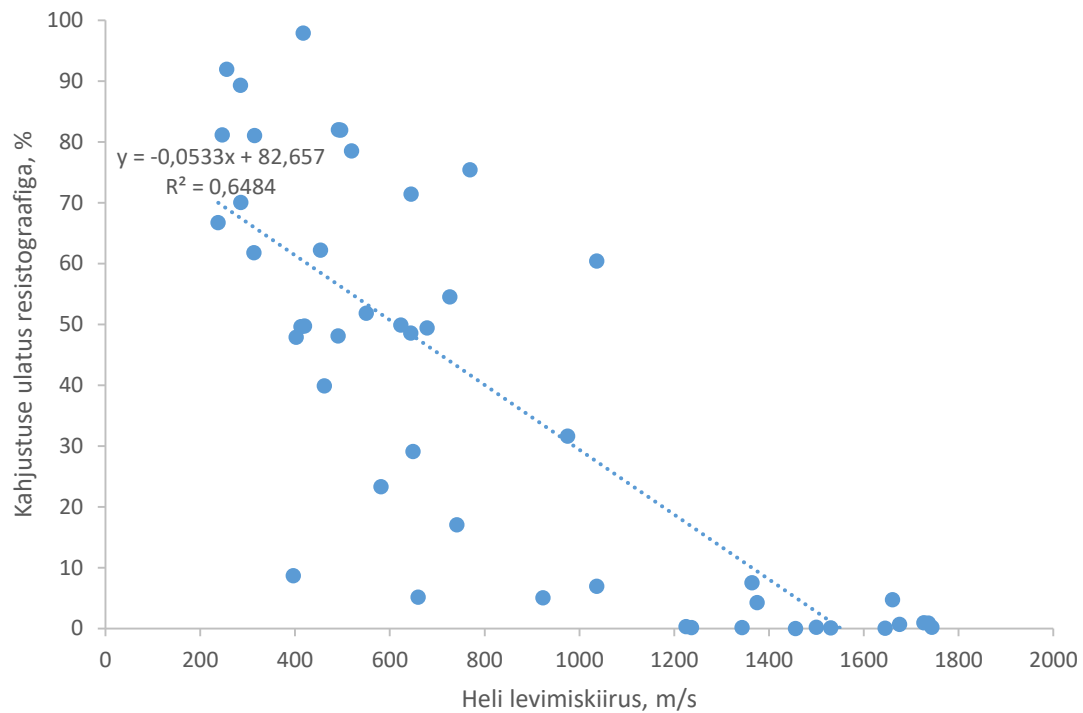
**Lisa 20.** Männist katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm



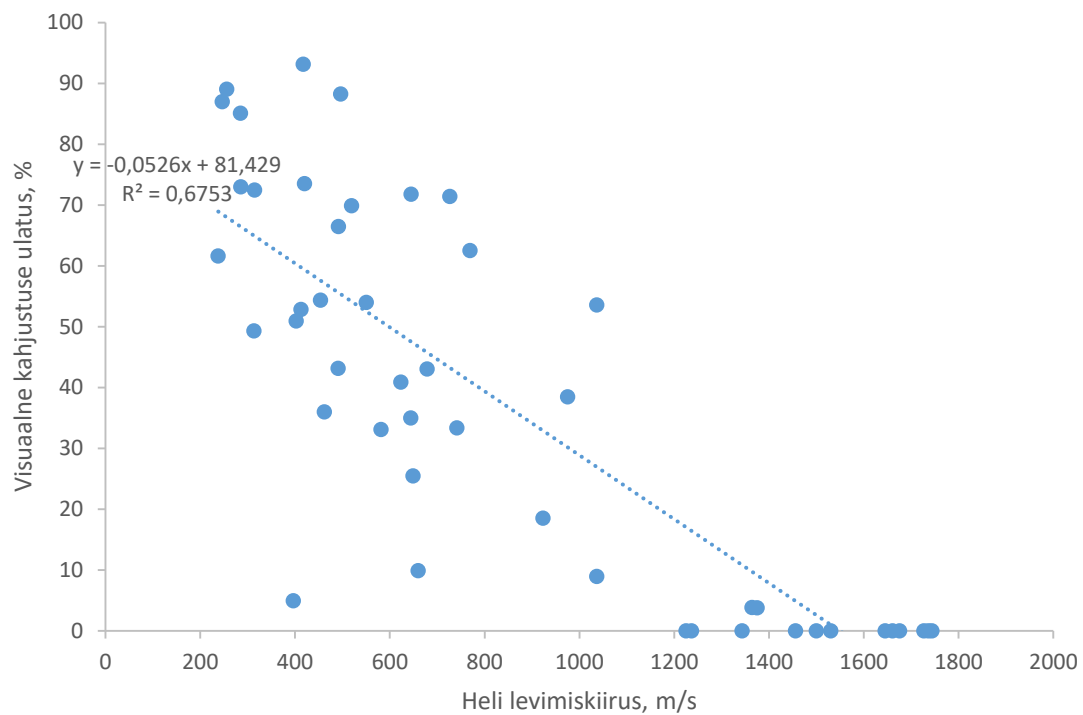
**Lisa 21.** Männist katsekehades radiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm



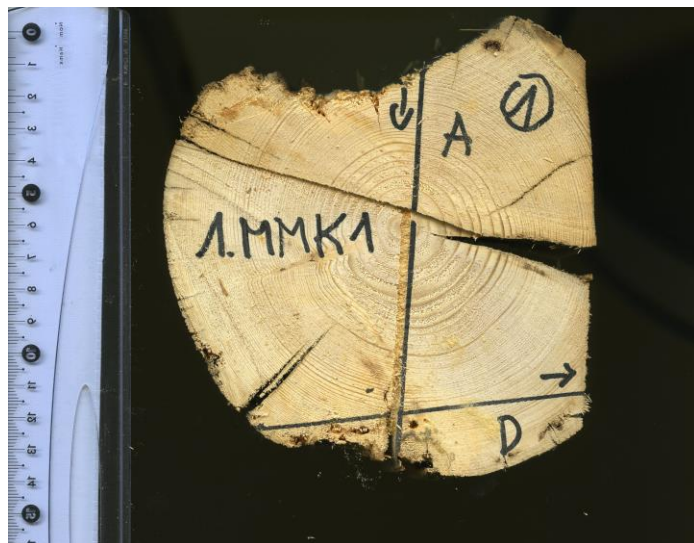
**Lisa 22.** Männist katsekehades tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja 90% resistograafi keskmistest näitudest allpool olevate väärtuste osakaalu hajuvusdiagramm



**Lisa 23.** Männist katsekehades tangentsiaalsuunalise heli levimiskiiruse ja visuaalse kahjustuse protsentuaalse osakaalu hajuvusdiagramm

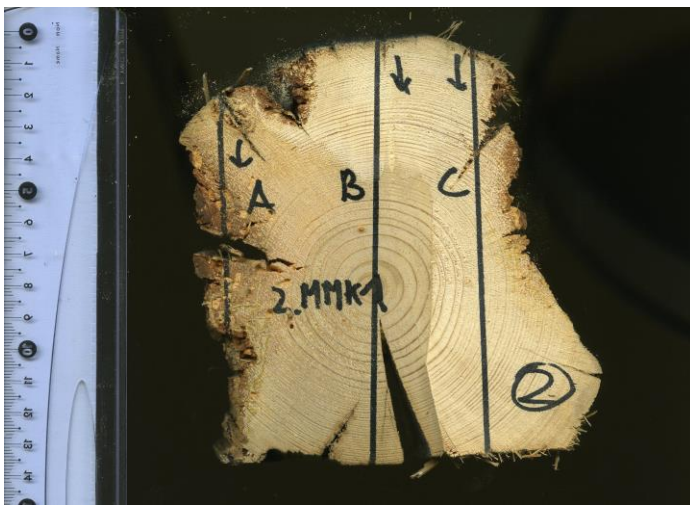
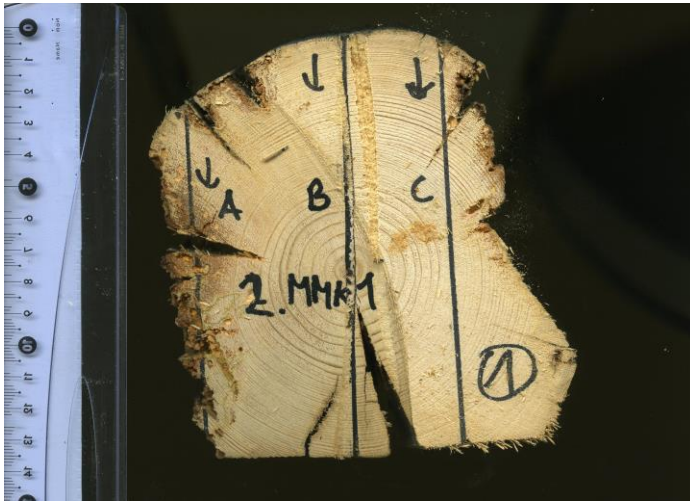


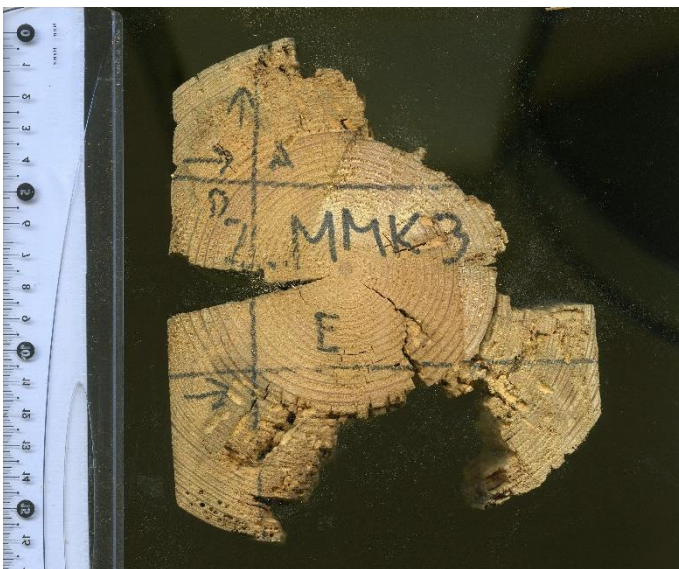
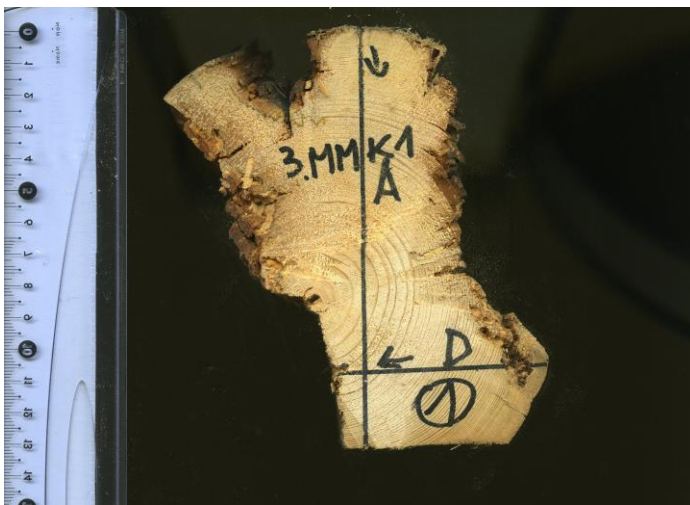
**Lisa 24.** Kõikide männist katsekehade mõõtmiskohtade ristlõiked



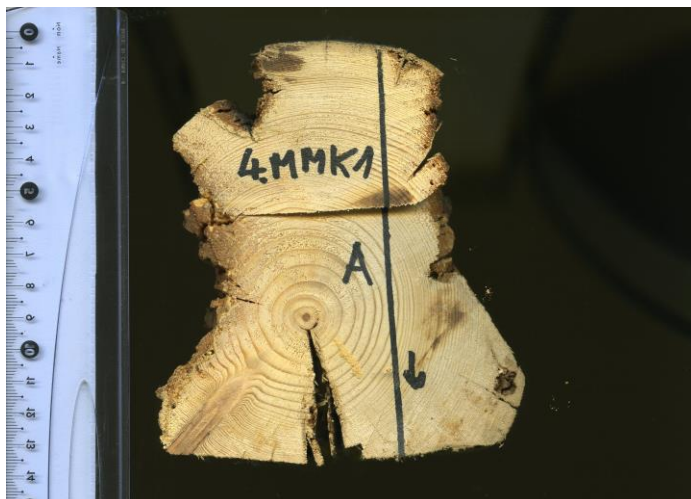
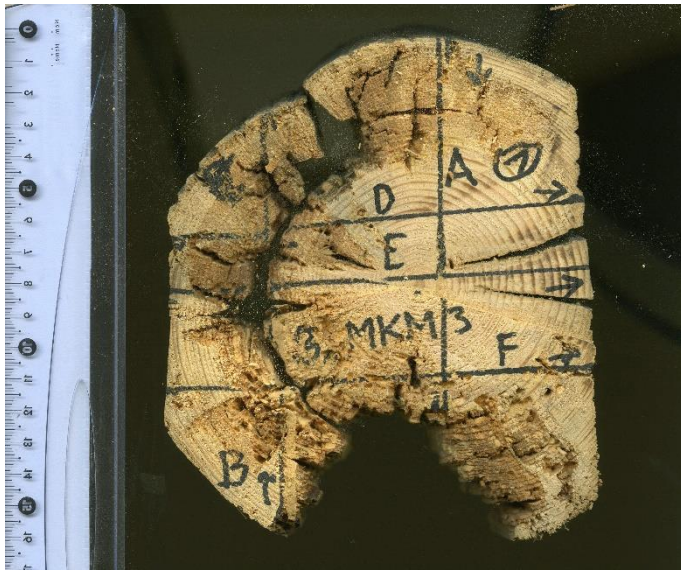


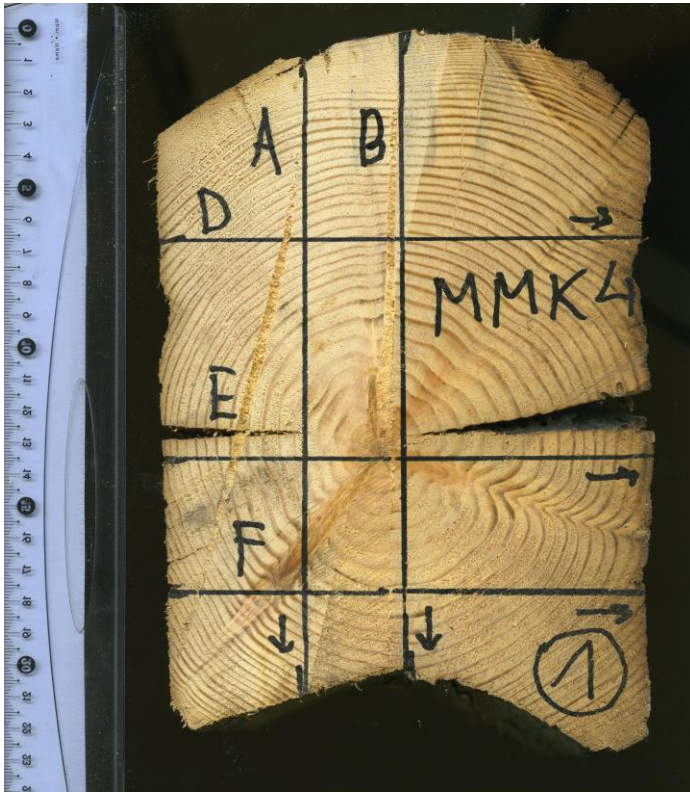








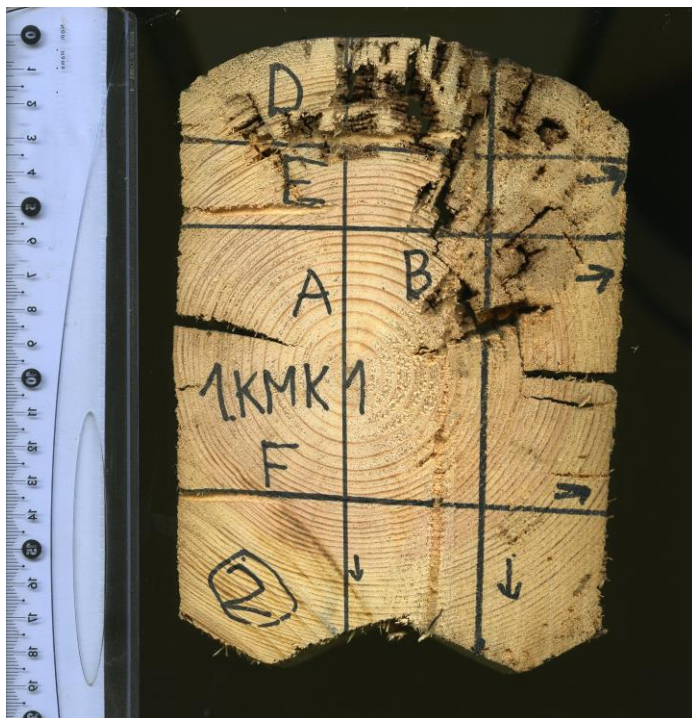
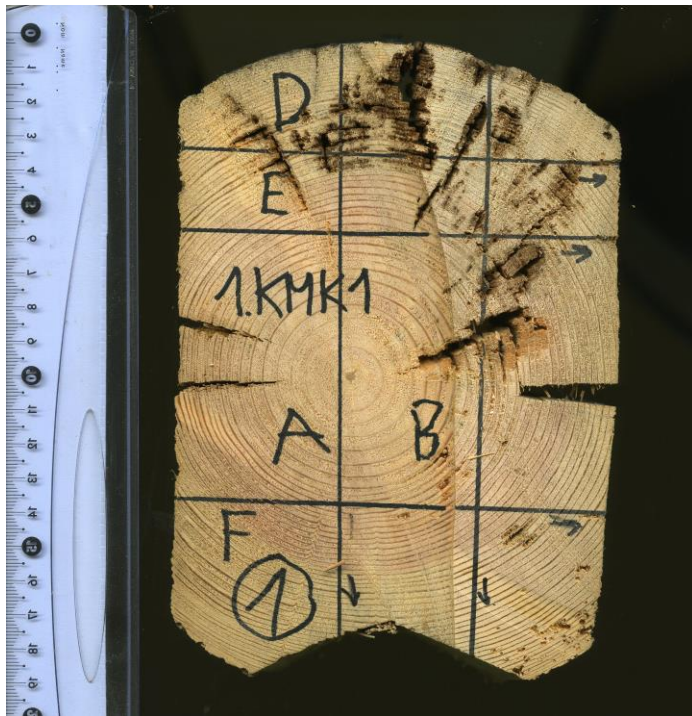


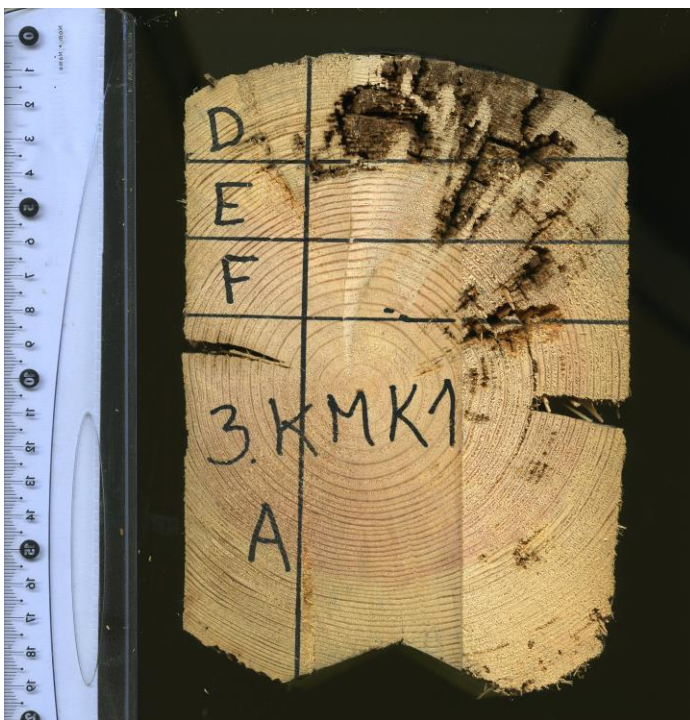






**Lisa 25.** Kõikide kuusest katsekehade mõõtmiskohtade ristlõiked





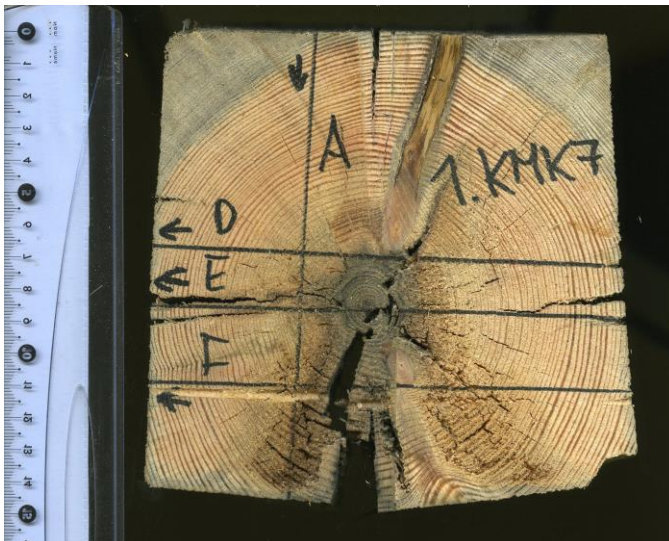




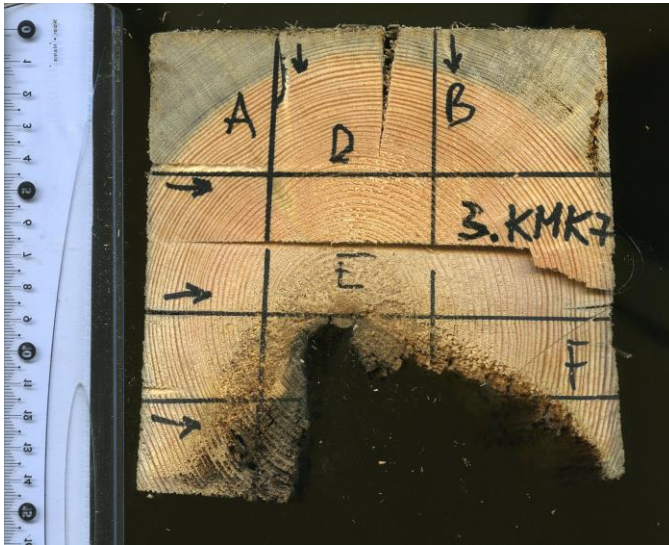


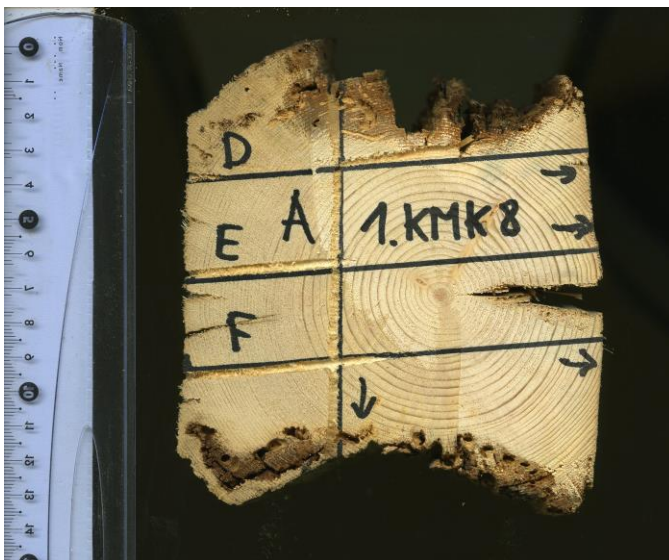




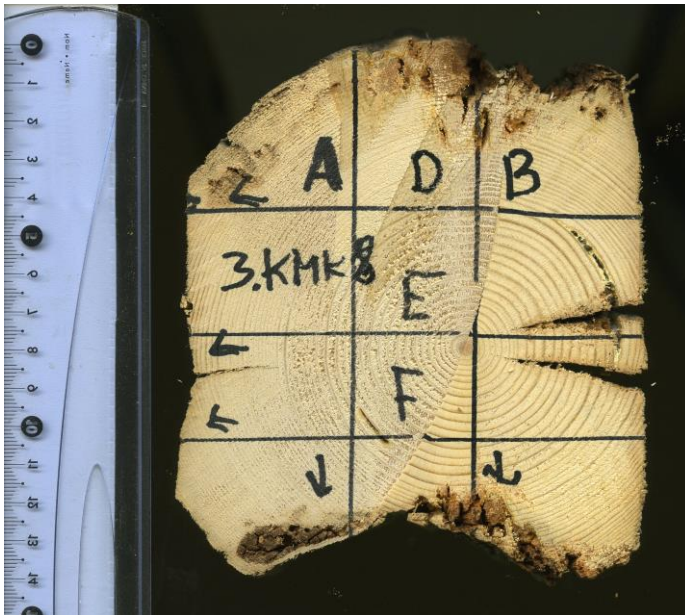


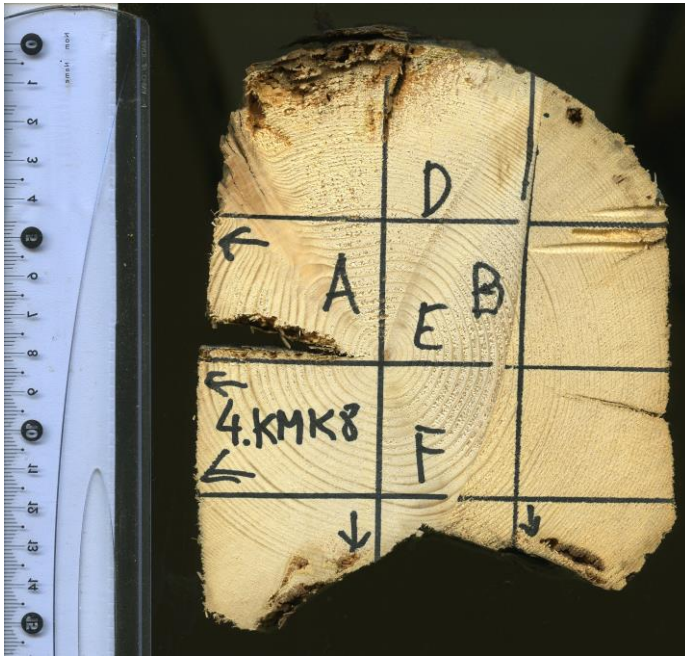




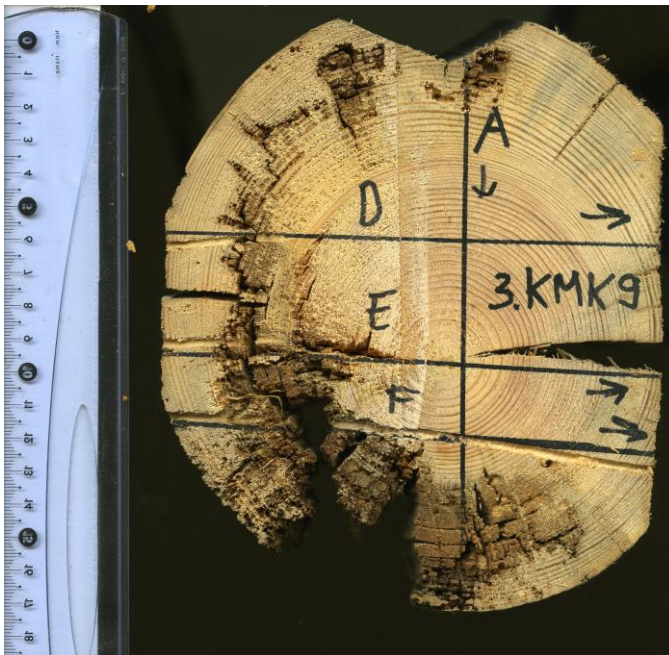
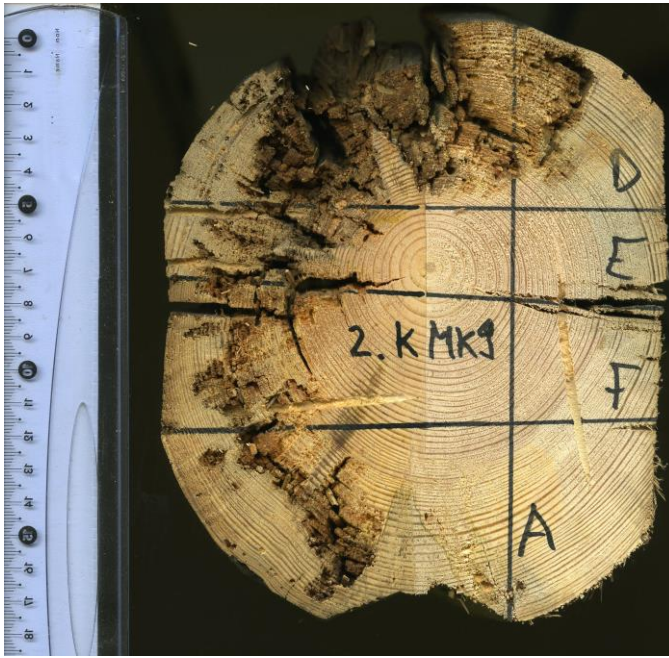












**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks  
ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Heinar Vaine,  
(sünnipäev 22/01/93 39301226021)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Heli levimisaja ja mikropuurimisel tekkiva vastupanu mõõtmise kahjustunud konstruktsioonipuidus“, mille juhendaja on Marko Teder,
  - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
  - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
  - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

\_\_\_\_\_

allkiri

Tartu, 22.05.2017

---

**Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Luban lõputöö kaitsmisele.

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)

\_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_

(kuupäev)